

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Universidade do Porto**

**FEUP** Faculdade de  
Engenharia

**Optimização do Programa de manutenção de centrais térmicas  
considerando previsões da evolução da procura e dos preços de  
mercado**

**Marcelo Leandro Pereira**

Tese submetida no âmbito do

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Major Energia

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Tomé Saraiva

Fevereiro de 2009




A Dissertação intitulada


**“OPTIMIZAÇÃO DO PROGRAMA DE MANUTENÇÃO DE CENTRAIS TÉRMICAS  
CONSIDERANDO PREVISÕES DA EVOLUÇÃO DA PROCURA E DOS PREÇOS DE  
MERCADO”**

foi aprovada em provas realizadas em 25/Fevereiro/2009

o júri

  
presidente Professor Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura  
professor catedrático da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

  
Professor Doutor Pedro Alexandre Flores Correia  
professor auxiliar do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa

  
Professor Doutor João Paulo Tomé Saraiva  
professor associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados

Autor - Marcelo Leandro Pereira



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## RESUMO

Com a crescente dependência energética do mundo verifica-se a necessidade de desenvolver aplicações computacionais para melhor organização e optimização das soluções de diversos problemas. No âmbito dos mercados de electricidade existe a necessidade de tomar decisões racionais para que a gestão do capital esteja assegurada.

Desta forma, foi desenvolvida uma ferramenta que realiza a optimização do programa de manutenção de centrais térmicas de modo a evitar a tomada de decisões de forma empírica em relação à calendarização das respectivas manutenções. A utilização desta ferramenta permite obter soluções optimizadas tendo em conta todas as restrições do problema.

A manutenção das centrais térmicas, mesmo em ambiente de mercado, tem de ser coordenada com o Gestor do Sistema de modo a serem garantidas todas as questões de segurança de abastecimento e de qualidade de serviço. A realização de manutenções programadas de forma desordenada não faz sentido. Desta forma, há todo o interesse em que essa manutenção seja coordenada e seja realizada do modo mais económico possível, garantindo todas as condições de segurança.

Para obter soluções optimizadas foi utilizada uma técnica englobada nas Metaheurísticas, nomeadamente *Simulated Annealing*. Trata-se de uma metodologia que é utilizada para identificar uma solução de boa qualidade em problemas combinatórios. Esta técnica inclui um mecanismo que permite ultrapassar óptimos locais de forma a caminhar para soluções de melhor qualidade.

O presente trabalho inclui uma revisão do estado da arte em relação ao problema de programação da manutenção de centrais eléctricas, integra um capítulo sobre metaheurísticas, um outro em que é formulado o problema e se apresenta o algoritmo de solução adoptado e um outro em que são apresentados os resultados obtidos considerando um sistema produtor de dimensão realista.

Finalmente, deve assinalar-se que este trabalho foi proposto pela EDP Produção cujos técnicos acompanharam o seu desenvolvimento e validação dos resultados obtidos.



## **ABSTRACT**

With the world energy increasing dependency, it is necessary to develop computer applications to gain better organization and optimization of solutions. Talking about electricity markets, it is necessary to adopt rational decisions so that the capital management is assured.

Thus, in this work it was developed a tool that performs the optimization of the maintenance scheduled of thermal power stations in order to avoid taking empirical decisions when scheduling their maintenances. Using this tool we can then obtain good quality solutions while taking into account all the problem constraints.

The maintenance of thermal power stations, even in a market environment, must be coordinated with the System Operator in order to guarantee all the security of supply issues and service quality. The uncoordinated maintenance scheduling does not make sense. Thus, there exists all the interest in coordinating maintenance actions ensuring that they are done in the most economical possible way, ensuring all security conditions.

To obtain good quality solutions, we used one metaheuristic technique, namely Simulated Annealing. It is a methodology that is used to find a solution of good quality on combinatorial problems. This technique includes a mechanism that it is able to exit from local optimum so that the search is directed to better quality solutions.

This work includes a review of the state of the art regarding the maintenance scheduling problem of power stations, it includes chapters where the problem is formulated and the adopted solution algorithm is detailed. Finally, this work includes a chapter presenting the results considering a realistic generation system.

Finally, it should be mentioned that this work was proposed by EDP Produção and that several engineers of this company accompanied its development and collaborated in the validation of results.





## **AGRADECIMENTOS**

A meus pais, pela educação, carinho e apoio prestado.

Ao meu irmão pelos incentivos demonstrados durante todos os momentos.

Ao meu orientador Professor João Tomé Saraiva pela oportunidade de realização deste trabalho e pela disponibilidade incondicional prestada.

Ao Sr. Eng.<sup>o</sup> José Carlos Sousa pela disposição em ajudar sempre que foi necessário.

Ao Sr. Eng.<sup>o</sup> Virgílio Mendes pela motivação.

Ao Sr. Eng.<sup>o</sup> Jorge Pereira pelas recomendações concedidas.

Ao Daniel Ribeiro pela motivação e companheirismo.

A todos meus amigos do DEEC da Feup.

A todos os que me incentivaram a continuar...



*“Uma caminhada de mil léguas começa sempre com o primeiro passo”*

Provérbio chinês

*“Devemos aprender durante toda a vida,  
sem imaginar que a sabedoria vem com a velhice”*

Platão

*“Tudo é o mais complicado que parece”*

Lei de Murphy



# Índice

RESUMO.....	iii
ABSTRACT .....	v
AGRADECIMENTOS.....	vii
Índice .....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE GRÁFICOS.....	xix
Capítulo 1.....	1
Introdução .....	1
1.1 Aspectos Gerais.....	1
1.2 Objectivos e Campo de Aplicação .....	2
1.3 Organização do texto .....	3
Capítulo 2.....	5
Estado da Arte .....	5
2.1 Aplicação utilizando Colónia de Formigas.....	5
2.2 Aplicação utilizando Algoritmos Genéticos.....	7
Capítulo 3.....	9
Metaheurísticas.....	9
3.1 Breve introdução às metaheurísticas.....	9
3.2 Os MÉTODOS <i>TABU SEARCH</i> .....	10
3.2.1 Introdução aos Métodos de <i>Tabu Search</i> .....	11
3.2.2 Critério de Paragem.....	12
3.2.3 Os Defeitos dos Métodos <i>Tabu Search</i> .....	13
3.2.4 As Extensões dos Métodos de Pesquisa <i>Tabu</i> .....	14
3.2.5 Conclusão sobre os Métodos <i>Tabu Search</i> .....	15
3.3 <i>MULTI-START</i> .....	15
3.4 <i>GREEDY RANDOMIZED ADAPTIVE SEARCH PROCEDURE (GRASP)</i> .....	16
3.4.1 Algoritmo genérico .....	16
3.4.2 Fase de construção .....	17

3.4.3	Fase de Procura Local .....	18
3.4.4	Qualidade da Solução .....	18
3.5	ALGORITMOS GENÉTICOS .....	19
3.5.1	Princípios Básicos.....	19
3.5.2	Características Gerais dos AGs .....	22
3.5.3	Como Funcionam os AGs.....	23
3.5.3.1	Adaptabilidade ou Adequabilidade .....	23
3.5.3.2	Processo de Selecção .....	23
3.5.3.3	Operadores Genéticos .....	24
3.5.3.4	Parâmetros Genéticos .....	25
3.6	PESQUISA DE VIZINHANÇA VARIÁVEL - ( <i>VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH</i> ) .....	26
3.7	COLÓNIAS DE FORMIGAS ( <i>ANT COLONIES</i> ).....	27
3.7.1	Princípio.....	27
3.7.2	Comentários .....	29
3.8	<i>SIMULATED ANNEALING</i> .....	29
3.8.1	Analogia .....	30
3.8.2	Aplicação à optimização, algoritmo de Metropolis.....	31
3.8.3	Comentários .....	36
3.8.4	Projectos existentes utilizando esta técnica .....	36
3.8.4.1	Decisões Gerais e Decisões Específicas .....	37
3.8.4.2	Formulação Matemática do Problema .....	38
	REDE A .....	41
	REDE B.....	42
Capítulo 4.....		45
Metodologia implementada.....		45
4.1	Modelização do Problema .....	45
	Definições Gerais .....	46
	Características do modelo .....	46
4.2	Dados do Problema .....	47
4.3	Formulação Matemática do Problema .....	47
4.4	Fluxograma do Problema .....	50
Capítulo 5.....		55

Caso de Estudo .....	55
5.1    Dados do Problema .....	55
5.2    Técnica usada .....	62
5.3    Resultados .....	63
1º Exemplo.....	64
2º Exemplo.....	67
Capítulo 6.....	73
Conclusões.....	73
Bibliografia.....	75
Anexos .....	77





## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma da aplicação ACO-PPMSO .....	6
Figura 2.2 – Fluxograma do algoritmo de resolução .....	7
Figura 3.1 – Exemplo de um movimento <i>Tabu</i> .....	12
Figura 3.2 – Efeito do Funil sobre as vizinhanças .....	13
Figura 3.3 – Um efeito nocivo do procedimento de Descida Agressiva.....	14
Figura 3.4 – Exemplo de <i>crossover</i> um-ponto .....	25
Figura 3.5 – Estado desordenado das moléculas da matéria em fusão .....	30
Figura 3.6 – Estado desordenado das moléculas devido a um arrefecimento rápido ...	30
Figura 3.7 – Estado ordenado das moléculas devido a um arrefecimento lento .....	31
Figura 3.8 – Funcionamento do algoritmo de <i>Simulated Annealing</i> ilustrando a forma de escapar de óptimos locais .....	32
Figura 3.9 – Fluxograma <i>Simulated Annealing</i> .....	35
Figura 3.10 – Evolução da função de aceitação para a solução actual de pesquisa (traço contínuo) e para o melhor valor encontrado (a tracejado) na rede com 24 barramentos .....	42
Figura 3.11 – Evolução da função objectivo para a solução actual de procura (a traço contínuo) e para o melhor valor encontrado (a tracejado) na rede com 645 barramentos .....	43
Figura 4.1 – Fluxograma de resolução do problema de calendarização das acções de manutenção .....	51-53
Figura 5.1 – Ambiente de trabalho do programa MAINT, janela de apresentação .....	56
Figura 5.2 – Janela referente às centrais .....	57
Figura 5.3 – Janela referente à produção hídrica .....	57
Figura 5.4 – Janela referente à produção eólica .....	58
Figura 5.5 – Janela referente à produção em outras PRE .....	58
Figura 5.6 – Janela referente à produção térmica .....	59
Figura 5.7 – Janela referente à potência que flui nas linhas de interligações .....	59
Figura 5.8 – Janela referente à potência de carga .....	60
Figura 5.9 – Janela contendo a calendarização das manutenções .....	60
Figura 5.10 – Janela contendo os resultados do despacho económico para cada um dos 5 períodos considerados .....	61
Figura 5.11 – Janela referente aos resultados das iterações .....	61
Figura 5.12 – Janela referente à evolução da função de avaliação .....	62
Figura 5.13 – Calendarização do programa de manutenção dos grupos referente ao 1º exemplo .....	65

Figura 5.14 – Calendarização do programa de manutenção dos grupos referente ao 2º exemplo .....	69
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Disponibilidade dos grupos referente ao 1º exemplo .....	64
Tabela 5.2 – Disponibilidade dos grupos referente ao 2º exemplo .....	67
Tabela 5.3 – Intervalo de semanas para manutenção dos grupos referente ao 2º exemplo .....	68
Tabela A1 – Características das centrais intervenientes no problema .....	79
Tabela A2 - Características dos grupos considerados no 1º período horário .....	80
Tabela A3 - Características dos grupos considerados no 2º período horário .....	81
Tabela A4 - Características dos grupos considerados no 3º período horário .....	82
Tabela A5 - Características dos grupos considerados no 4º período horário .....	83
Tabela A6 - Características dos grupos considerados no 5º período horário .....	84
Tabela A7 – Disponibilidade dos grupos, variável $i_{kt}$ .....	85
Tabela A8 – Divisão de meses para semanas .....	86
Tabela A9 – Valores da carga referentes ao ano de 2005 .....	87
Tabela A9 – Valores da carga referentes ao ano de 2005. (Continuação) .....	88
Tabela A10 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Hídrica.....	89
Tabela A10 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Hídrica. (continuação) .....	90
Tabela A11 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Eólica .....	91
Tabela A11 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Eólica. (Continuação) .....	92
Tabela A12 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Outras PRE .....	93
Tabela A12 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Outras PRE. (continuação) .....	94
Tabela A13 – Valores referentes ao ano 2005 de energia eléctrica relativa às Interligações .....	95
Tabela A13 – Valores referentes ao ano 2005 de energia eléctrica relativa às Interligações. (continuação) .....	96
Tabela A14 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Térmica .....	97
Tabela A14 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Térmica. (continuação) .....	98
Tabela A15 – Despacho relativo ao 1º exemplo para o 1º período .....	99
Tabela A16 – Despacho relativo ao 1º exemplo para o 2º período .....	99

Tabela A17 – Despacho relativo ao 1º exemplo para o 3º período .....	100
Tabela A18 – Despacho relativo ao 1º exemplo para o 4º período .....	100
Tabela A19 – Despacho relativo ao 1º exemplo para o 5º período .....	101
Tabela A20 – Despacho relativo ao 2º exemplo para o 1º período .....	102
Tabela A21 – Despacho relativo ao 2º exemplo para o 2º período .....	102
Tabela A22 – Despacho relativo ao 2º exemplo para o 3º período .....	103
Tabela A23 – Despacho relativo ao 2º exemplo para o 4º período .....	103
Tabela A24 – Despacho relativo ao 2º exemplo para o 5º período .....	104

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 – Evolução de $F(\text{óptimo})$ referente ao 1º exemplo .....	65
Gráfico 5.2 – Evolução de $F(\text{corrente})$ referente ao 1º exemplo .....	66
Gráfico 5.3 – Evolução de $F(\text{óptimo})$ e $F(\text{corrente})$ referente ao 1º exemplo .....	67
Gráfico 5.4 – Evolução de $F(\text{óptimo})$ referente ao 2º exemplo .....	69
Gráfico 5.5 – Evolução de $F(\text{corrente})$ referente ao 2º exemplo .....	70
Gráfico 5.6 – Evolução de $F(\text{óptimo})$ e $F(\text{corrente})$ referente ao 2º exemplo .....	71



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Aspectos Gerais

Todo o sistema produtor está destinado a exercer uma função determinada relacionada com a satisfação da procura. A qualquer sistema produtor está associado um custo de produção, que se procura minimizar.

Por outro lado, qualquer sistema produtor está sujeito a avarias de diversos tipos, com carácter aleatório no tempo, que influenciam desfavoravelmente a qualidade e o custo dos serviços por ele prestados. Para que, com uma probabilidade de sucesso mais elevada, ele possa corresponder às solicitações exteriores é, em geral, necessário proceder a acções de manutenção preventiva das suas unidades componentes, tendentes a reduzir a frequência das avarias fortuitas. A estas acções de manutenção associam-se, porém, certos encargos que importa determinar, de forma que o custo global de produção resulte mínimo.

Haverá então grande interesse em determinar, dentro de condições técnico-económicas, uma política de manutenção que conduza a esse custo mínimo. Torna-se portanto essencial definir os critérios a minimizar e determinar as condições consideradas imprescindíveis para a realização de uma manutenção eficaz.

A fase de planeamento da operação de unidades de produção tem em conta variados indicadores, fornecidos por modelos matemáticos mais ou menos elaborados. Esses modelos pretendem simular a exploração optimizada de um sistema produtor - consumidor, cujos parâmetros se admite serem completamente conhecidos nos modelos determinísticos.

Num modelo de tipo determinístico, a noção de custo mínimo é relativa, uma vez que depende das condições em que as unidades de produção foram postas à disposição do modelo, para simulação. Por outras palavras, o custo mínimo dependerá necessariamente da política de manutenção adoptada para o sistema produtor. Surge assim a necessidade de introduzir na fase de planeamento, e a par de outros, um

modelo que permita estabelecer uma política otimizada de manutenção para o sistema.

Tendo em conta estes aspectos, a EDP Produção propôs a realização deste trabalho em que se pretende desenvolver uma aplicação computacional para identificar uma solução otimizada para o problema de calendarização da manutenção programada de centrais térmicas, tal como se refirará em seguida.

## **1.2 Objectivos e Campo de Aplicação**

Este trabalho visou desenvolver uma aplicação computacional com o objectivo de obter um programa de paragens multisemanais para a realização de acções de manutenção de um conjunto de centrais termoeléctricas, de forma a garantir uma margem de reserva mínima e, tendencialmente, a minimização dos encargos variáveis anuais de exploração das centrais térmicas. Como tal, foi implementado um programa em VBA (*Visual Basic for Applications*) que permite obter a calendarização das manutenções para os diferentes grupos respeitando todas as restrições relevantes e, simultaneamente, minimizando o custo para o sistema. De salientar que a procura tem de ser satisfeita plenamente e que, por outro lado, são calculados despachos para cada um dos 5 períodos horários considerados, sendo também todos eles analisados de forma a garantir a satisfação da carga.

Para a execução de tal projecto foram utilizados valores cedidos pela EDP Produção nomeadamente a nível de produções por via Hídrica, Eólica e outras PRE's, sendo também fornecidos os valores dos trânsitos de potência nas interligações e os consumos. Subtraindo à carga as produções e os trânsitos nas interligações obtém-se a necessidade de produção por via térmica. Atendendo a estes valores de potência térmica a satisfazer, o programa terá de realizar despachos por ordem de mérito tendo em conta as manutenções e indisponibilidades dos grupos de forma a satisfazer a carga. Desta forma, terão de ser calculados 5 despachos referentes a 5 diferentes períodos horários que foram considerados.

Deve notar-se que o problema inclui várias restrições que têm que ser verificadas para que as soluções sejam credíveis e viáveis, tais como limites técnicos dos grupos, equipas de manutenção disponíveis para cada tipo de central, paragens ininterruptas, número de semanas de paragem de cada grupo e garantia de uma margem de reserva mínima em cada semana.

A aplicação computacional desenvolvida, denominada de MAINT, irá interagir no futuro com o modelo VALORAGUA. Esta interacção deve-se, essencialmente ao facto de o modelo VALORAGUA permitir realizar estudos de planeamento da



exploração onde se incluem várias centrais e novas tecnologias que poderão surgir no futuro. Desta forma, a calendarização das semanas de manutenção influencia muito o custo de operação do sistema uma vez que, dependendo da hidrologia e da produção em PRE, existem grandes variações dos custos marginais. Na prática, esta é a razão principal para se utilizar o programa MAINT, dado que se verifica que em sistemas hidrotérmicos o VALORAGUA apresenta resultados muito diferentes ao nível dos custos marginais se for considerado um plano de manutenções optimizado, ou então, um plano de manutenções de pior qualidade.

### 1.3 Organização do texto

Este documento está organizado em seis capítulos. No presente Capítulo, Introdução, descrevem-se de uma forma sucinta os objectivos do trabalho, a motivação e campo de aplicação e a estruturação da tese.

O segundo capítulo, aborda o estado da arte, sendo descritos dois projectos já existentes no âmbito de optimização da calendarização da manutenção de centrais térmicas adoptando a metaheurísticaa Colónia de Formigas e Algoritmos Genéticos.

No terceiro capítulo são descritas diversas Metaheurísticas existentes e a usada neste projecto, *Simulated Annealing*. Pretende-se neste capítulo dar a conhecer as metaheurísticas existentes e suas principais características. Também neste capítulo é descrito um projecto utilizando *Simulated Annealing* tendo em vista ilustrar a sua aplicação prática.

O quarto capítulo apresenta a formulação matemática e a descrição do problema incluindo dados necessários para o seu desenvolvimento e a explicação dos mesmos. Também neste capítulo é apresentado o fluxograma do algoritmo de solução de forma a proporcionar uma melhor compreensão do mesmo.

No quinto capítulo é apresentado o ambiente de trabalho da aplicação desenvolvida incluindo as janelas envolventes e uma breve descrição das mesmas. Neste capítulo também são descritas várias execuções do programa e são apresentados resultados e gráficos ilustrativos.

Finalmente, no capítulo seis expõe-se uma síntese do estudo realizado, apresentando-se as principais conclusões que foram obtidas com a realização deste trabalho.

O trabalho, a finalizar, inclui alguns anexos que contêm dados referente ao caso de estudo analisado bem como diversos resultados obtidos.



## Capítulo 2

### Estado da Arte

Neste capítulo são descritos dois trabalhos desenvolvidos para a resolução de um problema similar ao abordado. Na pesquisa bibliográfica realizada foram encontrados dois projectos desenvolvidos no âmbito deste assunto, ou seja, optimização da calendarização da manutenção de centrais térmicas. Tais projectos usam diferentes metaheurísticas para a sua resolução, nomeadamente Colónia de Formigas e Algoritmos Genéticos, que serão detalhadas no capítulo 3.

De seguida será feita uma pequena introdução ao problema em si demonstrando a motivação para tal desenvolvimento e toda a formulação do mesmo.

#### 2.1 Aplicação utilizando Colónia de Formigas

Com vista a prolongar a vida útil e reduzir o risco de avaria é necessário realizar manutenções nas unidades de produção de energia eléctrica. Tradicionalmente, as unidades de produção de energia eléctrica têm agendadas as suas manutenções em períodos onde a procura do sistema é plenamente satisfeita e a fiabilidade do sistema é maximizada. No entanto, existe a pressão de manter as unidades geradoras em produção, de forma a aumentar as receitas recebidas pelos participantes no mercado de electricidade. No entanto, a realização de acções de manutenção é inevitável, pelo que existe sempre a necessidade de saber quando esse período de manutenção é menos desfavorável minimizando as perdas de receitas.

Idealmente, as unidades de produção hídrica deverão funcionar durante os períodos em que os preços da electricidade são elevados, sendo colocadas em manutenção quando o preço é mais baixo. Portanto, a determinação do período óptimo para a manutenção dos grupos geradores num sistema de energia tornou-se uma importante tarefa tanto do ponto de vista da fiabilidade do sistema como do ponto de vista económico.

A metaheurística utilizada neste projecto [1] é inspirada no comportamento de uma colónia de formigas, que é um conceito relativamente novo nas metaheurísticas utilizadas para optimização combinatória.

A formulação considera todas as restrições encontradas geralmente como parte de problemas do mundo real. Como parte da formulação, foram utilizadas uma nova heurística e uma nova estratégia de busca local.

A aplicação de Colónia de Formigas tem proporcionado bons resultados para um número elevado de diferentes aplicações, tendo sido desenvolvida uma formulação que permite realizar o agendamento optimizado das manutenções das centrais de produção de energia eléctrica. Esta formulação é denominada como ACO-PPMSO (*power plant maintenance scheduling optimisation*). Esta formulação foi testada extensivamente em dois problemas, um incluindo 21 unidades e o outro 22 unidades. Verificou-se que a formulação ACO-PPMSO resultou em melhorias significativas no desempenho para ambos os casos em estudo comparativamente com os resultados obtidos em estudos anteriores. Além disso, a nova formulação mostrou-se útil para localizar os períodos de manutenção de modo que a capacidade de reserva seja mais uniformemente distribuída.

Na Figura 2.1 apresenta-se o fluxograma genérico desta formulação.

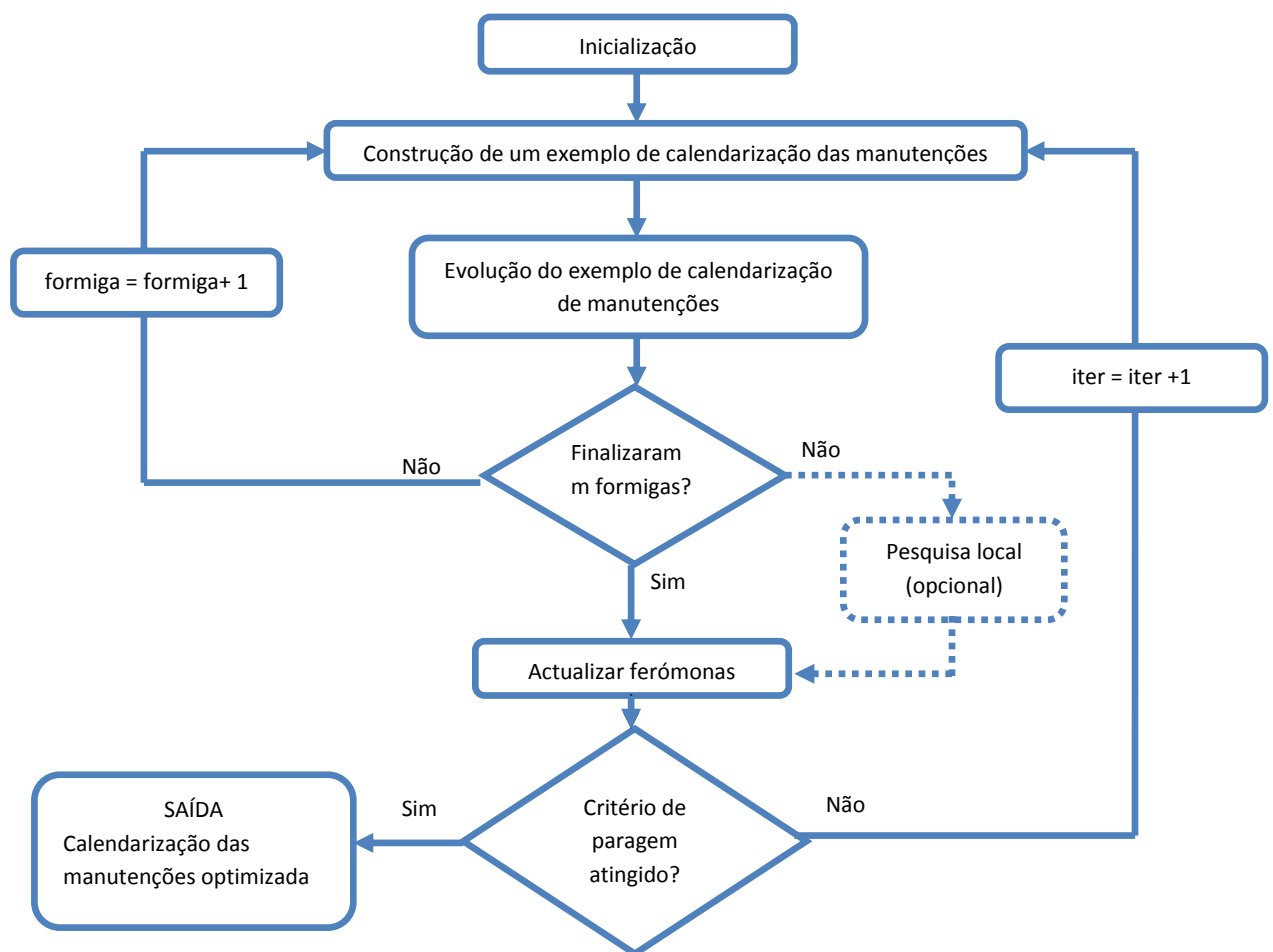


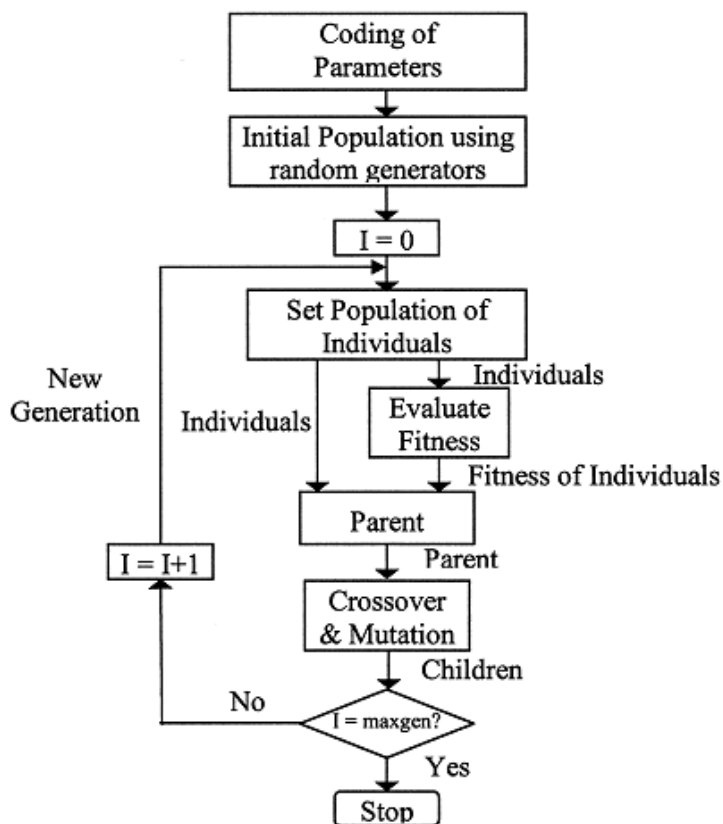
Figura 2.1 – Fluxograma da aplicação ACO-PPMSO.

## 2.2 Aplicação utilizando Algoritmos Genéticos

Este projecto utiliza uma outra metaheurística nomeadamente algoritmos genéticos, que será pormenorizado no Capítulo 3. Com este projecto, pretende-se ganhar tempo para substituição de equipamentos, obter menores custos de operação, melhorar o processo de tomada de decisões e controle, e melhor utilização da mão-de-obra disponível.

Muito trabalho tem sido feito no âmbito da procura da determinação do óptimo para a calendarização dos períodos de manutenção dos grupos geradores. Recentemente novas abordagens, como lógica *fuzzy* e algoritmos genéticos, têm sido aplicadas para a resolução do problema da calendarização das manutenções. Estas novas abordagens trabalham razoavelmente bem em sistemas de grande dimensão. Os algoritmos genéticos são técnicas de pesquisa adaptáveis baseadas em mecanismos de selecção natural decorrentes da simulação da evolução natural que fornecem uma ferramenta útil e prática para a optimização da programação de manutenção.

De seguida e de acordo com a referência [2] é apresentado na Figura 2.2 um fluxograma ilustrativo do método utilizado onde melhor se pode compreender esta técnica.



**Figura 2.2 – Fluxograma do algoritmo de resolução.**



# Capítulo 3

## Metaheurísticas

### 3.1 Breve introdução às metaheurísticas

A investigação direccionada para a resolução de problemas combinatórios vem sendo feita desde o início da década de 70. Tais problemas podem ser vistos como problemas de optimização combinatória que surgem numa grande variedade de contextos de planeamento, como projectos de sistemas de distribuição de energia eléctrica, posicionamento de satélites, projectos de computadores e de chips VLSI, escalonamento de veículos, alocação de trabalhadores ou máquinas e tarefas, corte de barras e placas, sequência de genes e DNA, classificação de plantas e animais, etc. Encontrar soluções óptimas, ou mesmo de boa qualidade, para este tipo de problemas é um desafio nem sempre fácil de ser vencido. Neste contexto, foram desenvolvidas Metaheurísticas para colmatar tais dificuldades.

Uma Metaheurística é entendida como um método heurístico para resolver de forma genérica problemas de optimização, sendo geralmente aplicadas a problemas para os quais não se conhece um algoritmo eficiente. Desta forma, as Metaheurísticas quando aplicadas a problemas de optimização têm como um dos seus objectivos gerarem procedimentos de procura em vizinhanças (no espaço de pesquisa – sendo este o espaço de todas as soluções possíveis) que evitem uma paragem prematura em óptimos locais, proporcionando soluções de melhor qualidade.

Nas últimas décadas, surgiram vários procedimentos enquadrados como Metaheurísticas na solução de diversos problemas possuindo carácter altamente combinatório. Algumas das mais amplamente divulgadas são: *Simulating Annealing*, *Tabu Search*, *Greedy Randomized Search Procedure (GRASP)*, *Variable Neighborhood Search (VNS)*, Algoritmos Genéticos e *Ant Colony*.

O sucesso de uma metaheurística depende de sua capacidade de:

- Adaptação a instâncias especiais;
- Escapar de óptimos locais;
- Fazer uso da estrutura do problema;

- Estruturar os dados de forma eficiente;
- Capacidade de pré-processamento;
- Adotar boas técnicas para construir soluções iniciais;
- Reinicializar procedimentos;
- Melhoria da solução através de procura local;
- Aleatoriedade controlada;
- Diversificar a procura quando nenhuma melhoria adicional parece possível;
- Intensificar a procura em regiões promissoras.

Estes princípios e ideias conduziram ao desenvolvimento de novas classes de heurísticas que melhoraram consideravelmente a eficiência de diversos algoritmos, muito frequentemente baseados em modelos da natureza.

O processo de pesquisa para obter uma boa solução consiste em aplicar em cada iteração uma metaheurística subordinada que tenha sido projectada para cada problema particular, na tentativa de escapar de ótimos locais, permitindo algumas delas controlar a deterioração das soluções para diversificar a procura.

As principais Metaheurísticas existentes são:

1. *Tabu Search*;
2. *Multi-start*;
3. *GRASP (Greedy Randomized Adaptive Procedure)*;
4. Algoritmos Genéticos;
5. *Variable Neighborhood Search (VNS)*;
6. Colónia de Formigas (*Ant Colonies*);
7. *Simulated Annealing*.

Nas secções seguintes será pormenorizada cada uma destas técnicas, deixando para o final a técnica utilizada neste trabalho, nomeadamente *Simulated Annealing*.

### 3.2 OS MÉTODOS *TABU SEARCH*

Os métodos *Tabu Search*, propostos inicialmente por Glover [3], são Metaheurísticas de melhoramento local que utilizam uma lista de movimentos proibidos para avançar em direcção a soluções de melhor qualidade. Contrariamente aos métodos estocásticos, não dispomos de nenhum resultado de convergência para estes métodos que na prática não são menos eficazes. Podemos encarar os métodos *Tabu Search* como processos que conduzem os sub-métodos de pesquisa em direcção à solução. O algoritmo seguinte oferece um esquema geral deste método.



### 3.2.1 Introdução aos Métodos de *Tabu Search*

Uma iteração de base consiste em explorar a totalidade da vizinhança da solução corrente para extrair o melhor vizinho, ou seja, tipicamente aquele que propõe a melhoria mais forte da função objectivo.

#### Algoritmo – *Tabu Search*

##### *Início*

**Gerar** uma solução inicial  $S^0$ ;

$S^* \leftarrow S \leftarrow S^0$ ;

$\tau \leftarrow \&$ ;

$k \leftarrow 0$ ;

**Enquanto** o critério de paragem não for satisfeito **Fazer**

$k \leftarrow k + 1$ ;

$T^k \leftarrow \&$ ;

Avaliar a vizinhança  $V(S)$

Extrair  $S'$  melhor elemento de  $V(S)$  tal que  $\{S \rightarrow S'\} \notin \tau$

**Se**  $S' \neq \text{nil}$  então

$S \leftarrow S'$ ;

$T^k \leftarrow \{S' \rightarrow S\}$

**Se**  $\text{Objectivo}(S') < \text{Objectivo}(S^*)$  então

$S^* \leftarrow S'$ ;

**Fim Se**;

**Fim Se**;

$\tau \leftarrow \tau \cup T^k$

$\tau \leftarrow \tau \cup T^{(k-\tau)}$

**Fim do Enquanto**

##### **Fim**

Neste algoritmo:

- $\tau$  – comprimento da lista Tabu;
- $k$  – contador;
- $S'$  – solução corrente;
- $S$  – solução actual;
- $S^0$  – solução inicial;
- $S^*$  – solução óptima;
- $T$  – lista Tabu;
- $\&$  – parâmetro de calibração;
- $V$  – vizinhança.

A grande novidade destes métodos consiste no facto de ser aceite o melhor elemento da vizinhança mesmo se ele degradar o valor da função objectivo. Desta forma, pretende-se que seja possível sair de óptimos locais. Tendo em vista não oscilar sobre um certo número de estados, são introduzidas as noções de movimento Tabu e de Lista Tabu. Quando se efectua o movimento  $S \Rightarrow S'$ , proíbe-se a realização do

movimento inverso  $S' \Rightarrow S$ , durante  $\tau$  iterações. Diz-se então que o movimento  $S' \Rightarrow S$  é Tabu. O conjunto de movimentos proibidos numa iteração dada constitui a lista Tabu e a constante  $\tau$  representa o comprimento da lista Tabu, correspondente ao número de iterações durante as quais um movimento é citado na lista Tabu. Por outro lado,  $\alpha$  é um parâmetro do processo que exige uma calibração minuciosa para um bom comportamento do método. O algoritmo atrás apresentado corresponde a um procedimento geral do processo de Tabu Search. Para dar um exemplo de movimento Tabu, consideremos a Figura 3.1. Se deslocarmos a peça 1 em direcção à casa  $a$ , o movimento  $a \rightarrow D6$  será proibido durante  $\tau$  iterações.

								8
		a	b	c				7
		h	1	d,i	j			6
		g	f,o	2	k			5
			n	m	l			4
								3
								2
								1
A	B	C	D	E	F	G	H	

Figura 3.1 - Exemplo de um movimento *Tabu*.

### 3.2.2 Critério de Paragem

No caso dos métodos deste género o teste de paragem não pode ser baseado sobre um teorema de convergência ou um resultado teórico. Além disso, os mais utilizados são puramente empíricos e dependem do número de iterações realizadas. Primeiramente, tendo em vista assegurar a paragem do processo de pesquisa, limita-se o número de iterações por uma constante chamada  $n_{\text{maxIterAbs}}$ . A maior parte das implementações propõem igualmente um limite, chamado  $n_{\text{maxIterRel}}$ , limitando assim o número de iterações realizadas desde a última modificação da melhor solução registada.

### 3.2.3 Os Defeitos dos Métodos *Tabu Search*

Os métodos *Tabu* são de simples implementação, mas apresentam dois inconvenientes importantes:

- O aparecimento de motivos ou de atractivos por consequência da exploração da vizinhança;
- Uma propensão à descida muito rápida em direcção a um óptimo local: a descida agressiva.

Em relação ao primeiro aspecto, consideremos a Figura 3.2. Os pontos A e B representam duas soluções possíveis obtidas no decurso do procedimento de pesquisa. Representam-se as suas vizinhanças  $V(A)$  e  $V(B)$  por círculos centrados nos pontos A e B.

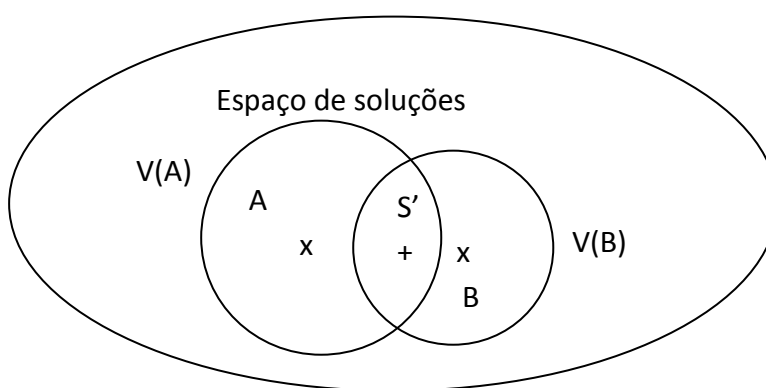


Figura 3.2 – Efeito do Funil sobre as vizinhanças.

Se as listas *Tabu* ou os critérios de aspiração a atingir o permitirem,  $S'$  será escolhido nos dois casos como a nova solução corrente. Segue-se uma sequência de soluções exploradas  $S_0 = S'$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ , ...,  $S_n$  idêntica nos dois casos e à qual se dá o nome de um motivo. Esta sequência será mais ou menos longa segundo os diferentes estados da lista *Tabu* ou os mecanismos escolhidos, mas esta será uma evidência prejudicial a este método. Com efeito, não somente se perderá tempo reavaliando várias vezes as mesmas soluções, como também não se ganhará conhecimento suplementar sobre o espaço de soluções.

Por outro lado, a descida agressiva corresponde igualmente a um efeito nocivo da exploração exaustiva da vizinhança visto que o método tem uma tendência para direccionar a trajectória de soluções em ordem a mínimos locais, de onde é difícil sair. Esta situação é ilustrada na Figura 3.3. A pesquisa prossegue desde  $S^0$  descendo até  $S^*$ , em seguida torna a subir para ser irresistivelmente atraído para o óptimo local. Esta situação onde a parte explorada do espaço das soluções oscila no círculo tracejado na Figura 3.3 é também geradora de motivos onde o comprimento coincide com o da lista

*Tabu*. Assim, resulta destes inconvenientes uma restrição desagradável da exploração do espaço das soluções. A maior parte das extensões que de seguida serão propostas pretendem combater de forma mais ou menos eficaz estes problemas, propondo especialmente mecanismos de diminuição da descida.

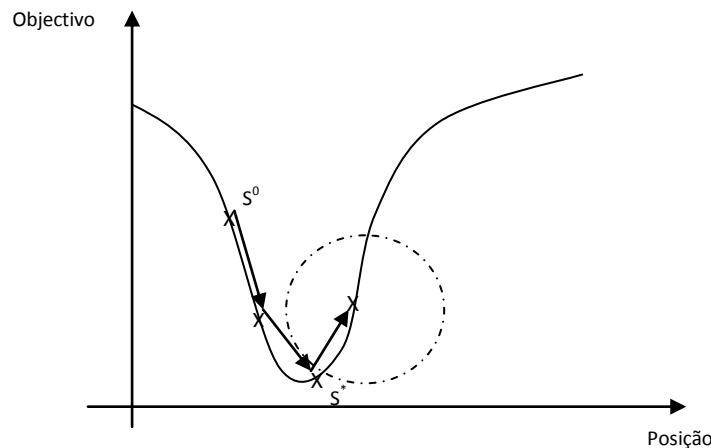


Figura 3.3 – Um efeito nocivo do procedimento de Descida Agressiva.

### 3.2.4 As Extensões dos Métodos de Pesquisa *Tabu*

Será agora apresentada uma lista dos principais melhoramentos introduzidos no mecanismo de base. Estas extensões são referidas em numerosos trabalhos, e são mais frequentemente adaptados a um problema particular.

Em primeiro lugar, os critérios de aspiração são técnicas que permitem aceitar certos movimentos *Tabu*, tidos como muito interessantes para o prosseguimento da pesquisa. Certamente, podemos ter numerosas razões para transpor uma proibição.

O mais simples dos critérios de aspiração consiste em aceitar todos movimentos em direcção a uma solução que melhore o registo da melhor solução obtida até essa altura. Este critério é quase unanimemente adoptado na maior parte das aplicações.

Em segundo lugar, as mutações obtidas são habitualmente métodos de qualidade que, por exemplo, no caso da exploração estocástica da vizinhança permitem ganhos de tempo sem prejudicar a qualidade da solução final. Estes métodos são também muito eficazes para conter os efeitos dos motivos ou da descida agressiva.

Nos casos em que a vizinhança é muito rica, ou seja, para cada solução, o número de vizinhos é muito elevado, pode-se realizar a sua redução sorteando os elementos a serem avaliados.

Outro método de selecção consiste na selecção estocástica que não se contenta em guardar o melhor vizinho encontrado, mas os  $\xi$  melhores, onde  $\xi$  é um parâmetro do processo. O vizinho a ser guardado será então sorteado de entre estes últimos. Esta técnica permite obter excelentes resultados, sobretudo se este é acoplado a uma exploração estocástica da vizinhança. A lista dos  $\xi$  melhores vizinhos é chamada lista de pré-selecção. Observemos que a selecção clássica corresponde a um caso particular da selecção estocástica em que  $\xi = 1$ .

A literatura da especialidade indica que a exploração e a selecção estocástica, longe de deteriorar a qualidade da solução final, podem, ao contrário, melhorá-la substancialmente. Este resultado pode parecer surpreendente mas explica-se experimentalmente. Com efeito, os mecanismos estocásticos combatem o aparecimento de motivos assegurando uma certa mistura dos movimentos realizados, pelo que se podem considerar na categoria dos mecanismos de diminuição da descida.

Em terceiro lugar, é frequente que várias vizinhanças sejam eficazes para um mesmo problema pelo que seria pouco eficiente utilizar unicamente uma. Também podemos utilizar mecanismos que permitem utilizá-las em conjunto ou separadamente. A utilização de várias vizinhanças sucessivamente permite assim combater eficazmente os motivos assegurando uma mistura dos vizinhos propostos.

### **3.2.5 Conclusão sobre os Métodos *Tabu Search***

Os métodos de *Tabu Search* são métodos muito versáteis de pesquisa local, pois prestam-se naturalmente às extensões mais diversas. Entretanto, se desejarmos implantar no método *Tabu* todos os mecanismos de extensão apresentados anteriormente, podemos depararmo-nos com um problema de coerência na definição do método. Historicamente, é esta razão mais importante que motiva a pesquisa da formulação genérica e unificada dos métodos de melhoramento iterativo.

## **3.3 *MULTI-START***

Esta metaheurística consiste em aplicar um procedimento de melhoria iterativa várias vezes para diferentes pontos iniciais, com soluções iniciais geradas aleatoriamente.

Admitindo um problema de minimização, em seguida é apresentado o algoritmo respectivo.

### **Algoritmo *Multi-start***

Passo 1: **Fixar**  $C(S^*) \leftarrow \infty$

Passo 2: Gerar aleatoriamente uma solução possível  $S^0$  e fixar  $S \leftarrow S^0$

Passo 3: **Enquanto** existir  $S' \in N(S)$  tal que  $C(S') < C(S)$  **fazer** Fixar  $S \leftarrow S'$

Passo 4: **Se**  $C(S) < C(S^*)$  **então** fixar  $S^* \leftarrow S$

Passo 5: **Se** outra solução inicial tem que ser verificada **então** voltar ao passo 2

Passo 6: **Imprimir** a melhor solução  $S^*$

Neste algoritmo:

- $C$  – função de avaliação;
- $S'$  – solução corrente;
- $S$  – solução actual;
- $S^0$  – solução inicial;
- $S^*$  – solução óptima;
- $N$  – vizinhança.

Alguns comentários podem ser feitos sobre as estratégias *Multi-Start*:

- O passo básico consiste na repetição sucessiva de melhorias iterativas;
- É de fácil implementação;
- As soluções geradas aleatoriamente podem ser muito nocivas;
- Os tempos de processamento podem ser muito elevados se as soluções iniciais estiverem longe de óptimos locais.

## **3.4 GREEDY RANDOMIZED ADAPTIVE SEARCH PROCEDURE (GRASP)**

### **3.4.1 Algoritmo genérico**

O método GRASP pode ser considerado como um aperfeiçoamento do método *Multi-Start* já que, em vez de cada iteração se iniciar num ponto aleatório, a estratégia GRASP faz uso de uma heurística ambiciosa para obter a solução inicial de cada iteração. Construções ambiciosas conduzem a soluções próximas de óptimos locais, acelerando a procura local. Este método encontra-se detalhado em Prais [4] e em Feo [5].

Assim, o GRASP pode ser considerado como uma combinação de métodos construtivos com procura local existindo um procedimento iterativo com completa independência de iterações. Cada iteração é constituída por duas fases:

- Construção;
- Procura local.

De seguida é apresentado o algoritmo referente ao método GRASP.

#### **Algoritmo GRASP**

Passo 1: **Fixar**  $C(S^*) \leftarrow \infty$

Passo 2: **Para** Nmax de iterações **fazer**

Construir uma solução S usando algoritmo ambicioso aleatório

Aplicar um procedimento de procura local começando em S e terminando em  $S^*$

**Se**  $C(S^*)$  melhorar a melhor solução corrente  $S^*$ , ou seja, **Se**  $C(S') < C(S^*)$  **então**

Fixar  $S^* \leftarrow S'$ ;

Passo 3: **Imprimir** a melhor solução  $S^*$

Neste algoritmo:

- C – função de avaliação;
- $S'$  – solução corrente;
- S – solução actual;
- $S^0$  – solução inicial;
- $S^*$  – solução óptima;
- Nmax – número máximo de iterações.

#### **3.4.2 Fase de construção**

A fase de construção consiste em:

- Ao utilizar um critério ambicioso, avaliar o benefício de incluir cada elemento na solução;
- Criar uma lista de candidatos restrita, formada pelos elementos cujos benefícios se encontram entre os melhores;
- Aleatoriamente, seleccionar um elemento da lista de candidatos;
- Adaptar as informações do problema de acordo com o elemento incluído;
- A escolha do próximo elemento a ser adicionado é determinada colocando todos elementos na lista, e realizando a sua ordenação tendo em conta a função ambiciosa.

Candidatos a novos elementos desta lista podem não ser considerados atendendo ao número máximo de elementos na lista e ao valor dos elementos com respeito à escolha ambiciosa.

A selecção de um candidato é realizada de entre os melhores candidatos da lista (não necessariamente o candidato do topo da lista). Assim, soluções com qualidade dependem da qualidade dos elementos na lista de candidatos  $L$  e a diversidade de solução depende da cardinalidade da lista de candidatos  $L$ .

### 3.4.3 Fase de Procura Local

A fase de construção não termina necessariamente num óptimo local, visto que a pesquisa pode apenas melhorar a solução encontrada.

A implementação deste algoritmo exige alguns cuidados nomeadamente:

- Escolher uma vizinhança apropriada;
- Usar estruturas de dados eficientes para acelerar a procura local;
- Ter uma boa solução inicial.

A utilização de uma boa solução inicial (perto de um óptimo local), permite uma eficiência muito elevada do processo de pesquisa.

### 3.4.4 Qualidade da Solução

GRASP pode ser visto como uma técnica de pesquisa repetitiva no espaço de solução:

- a) Cada iteração do GRASP age como uma solução de uma distribuição desconhecida;
- b) A média e a variância da amostra dependem das restrições impostas para a criação da lista restrita de candidatos (LRC).

Apresentam-se em seguida alguns comentários gerais relativos a esta técnica:

- É de fácil implementação, dada uma heurística ambiciosa e um procedimento de pesquisa local;
- Podem ser concebidas heurísticas ambiciosas para quase todos os problemas de optimização combinatória;



- Alguns parâmetros podem ser fixos: restrições da lista candidata (dimensão ou qualidade) e número de iterações;
- Ao contrário do método *Tabu Search*, o método GRASP precisa de boas soluções iniciais. O método *Tabu Search* integra mecanismos como diversificação e intensificação para atingir uma boa solução, ainda que a solução inicial seja má. O método GRASP confia na aleatoriedade de uma iteração para outra e cada iteração beneficia da qualidade da solução inicial;
- Uso de filtros para acelerar a pesquisa local. É possível aplicar pesquisa local unicamente para a melhor de uma sucessão de soluções construídas pela fase de construção e também aplicando pesquisa local unicamente para soluções construídas pela fase de construção que satisfaça algum critério de aceitação.

### 3.5 ALGORITMOS GENÉTICOS

#### 3.5.1 Princípios Básicos

Muitos dos problemas que a Inteligência Artificial (IA) tenta resolver têm como inerente a procura de uma solução em espaços vastos de candidatos sujeitos a diversas restrições, não existindo em muitos casos nenhum conhecimento *a priori* sobre o problema. É neste contexto que surgem os algoritmos genéticos (AG) Tomassini [6] como uma forma de resolver problemas de procura adaptativa nos quais o conhecimento para controlar a procura é obtido dinamicamente.

As espécies naturais lutam permanentemente pela sobrevivência tentando adaptar-se ao ambiente em que estão inseridas. É sabido que ao longo dos tempos algumas espécies têm desaparecido enquanto outras novas têm aparecido. O ponto de vista de que os seres vivos evoluem de acordo com o princípio da selecção natural, defendido por Charles Darwin no século XIX, é hoje consensualmente aceite. A Teoria da selecção natural foi complementada com os estudos sobre genética iniciados por Mendel. Em termos gerais este paradigma indica que:

- Cada indivíduo transmite aos seus descendentes os seus traços característicos (genéticos);
- Numa população existem indivíduos com traços (características) diferentes;
- Os indivíduos com melhores características (mais adaptados) tendem a ter mais sucesso na transmissão dos seus traços característicos, pelo que uma população caminha no sentido da existência em maior número dos elementos mais adaptados ("mais fortes");
- Ao longo do tempo, a acumulação de pequenas mutações pode originar o aparecimento de novas espécies com melhor capacidade de sobrevivência;

- Processos de troca e aparecimento de (novo) material genético podem concorrer para uma melhor adaptabilidade.

A reprodução dos seres vivos envolve as células que os constituem. Estas possuem um núcleo que contém cromossomas. É nestes últimos que se encontram os genes responsáveis pela definição dos traços característicos dos indivíduos. Existem três mecanismos de base para explicar a dinâmica das populações:

- **Reprodução adaptativa:** as espécies reproduzem-se aumentando o número dos mais aptos (*fitness*);
- **Recombinação** (*crossover*): novas combinações de genes existentes;
- **Mutação** (*mutation*): aparecimento de genes com novas características.

Em termos gerais, a passagem de uma geração à seguinte faz-se de acordo com o princípio da reprodução adaptativa perturbado pelos mecanismos de recombinação e mutação.

Os algoritmos genéticos constituem uma versão computacional simplificada do que se passa na natureza. Qualquer problema a ser resolvido por esta abordagem passa pela identificação de um conjunto de elementos e pela definição de um conjunto de valores, a saber:

- **Geração** = uma população num dado instante do tempo;
- **População** = conjunto de indivíduos;
- **Indivíduo** = definido pelos seus cromossomas (tipicamente um);
- **Cromossoma** = conjunto de genes;
- **Gene** = codificação de um traço podendo tomar diferentes valores;
- **Função de adaptabilidade ou de adaptação** = medida da qualidade do indivíduo;
- **Recombinação** = troca de material genético entre dois indivíduos;
- **Mutação** = aparecimento de material genético novo com uma probabilidade que assume um valor tipicamente baixo, da ordem de 0.001;

Toda esta tarefa de procura e optimização possui vários componentes, entre eles: o espaço de procura, onde são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema e a função de avaliação (ou função custo), que corresponde a uma forma de avaliar os membros do espaço de soluções. Existem muitos métodos de procura e funções de avaliação. As técnicas de procura e optimização tradicionais iniciam-se com um único candidato que, iterativamente, é manipulado utilizando algumas heurísticas (estáticas) directamente associadas ao problema a ser solucionado. Geralmente, estes processos heurísticos não são algorítmicos e a sua simulação a nível computacional pode ser muito complexa. Apesar de estes métodos não serem suficientemente robustos, isto não implica que eles sejam supérfluos. Na prática, eles são amplamente utilizados, com sucesso, em inúmeras aplicações. Por

outro lado, as técnicas de computação evolucionária operam sobre uma população de candidatos em paralelo. Assim, estas técnicas podem realizar a procura em diferentes áreas do espaço de solução, alocando um número de membros apropriado para a procura em várias regiões.

Os Algoritmos Genéticos (AGs) diferem dos métodos tradicionais de procura e optimização principalmente em quatro aspectos:

- Os AGs trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- Os AGs trabalham com uma população e não com um único ponto;
- Os AGs utilizam informações relativas ao custo associado a uma solução e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- Os AGs utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas.

Os Algoritmos Genéticos são muito eficientes na procura de soluções de boa qualidade numa grande variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de procura tradicionais. Além de constituírem uma estratégia de gerar-e-testar muito elegante, por serem baseados na evolução biológica, são capazes de identificar e explorar factores ambientais e convergir para soluções de elevada qualidade em problemas muito complexos.

**"Quanto melhor um indivíduo se adapta ao seu meio ambiente, mais elevadas serão as suas probabilidades de sobreviver e originar descendentes".**

Este é o conceito básico da evolução genética biológica. A área biológica mais próxima ligada aos Algoritmos Genéticos é a Genética Populacional. Antes de prosseguir com uma análise das características destes algoritmos, é necessário ter em conta alguns conceitos básicos.

Inicialmente, é gerada uma população, formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções do problema. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada: a cada indivíduo é atribuída uma nota, ou índice, reflectindo sua capacidade de adaptação a determinado ambiente. Uma percentagem dos mais adaptados são mantidos, enquanto os outros são descartados. Os elementos mantidos pela selecção podem sofrer modificações nas suas características fundamentais através de mutações e cruzamento (*crossover*) ou recombinação genética originando descendentes para a próxima geração. Este processo, chamado reprodução, é repetido até ser obtida uma solução satisfatória.

Deve notar-se que embora possam parecer simplistas do ponto de vista biológico, estes algoritmos são suficientemente complexos para fornecer mecanismos de procura adaptativa poderosos e robustos.

### 3.5.2 Características Gerais dos AGs

Algoritmos Genéticos são algoritmos de optimização global, baseados nos mecanismos de selecção natural e da genética. Os AGs aplicam uma estratégia de procura paralela e estruturada, mas aleatória, que é direccionada ao reforço da procura de soluções com "elevada adaptação", ou seja, soluções nas quais a função a ser optimizada tem valores de boa qualidade.

Em cada iteração, os princípios de selecção e reprodução são aplicados numa população de candidatos que pode variar, dependendo da complexidade do problema e dos recursos computacionais disponíveis. Através da selecção, determina-se quais indivíduos que se vão reproduzir, gerando assim um número determinado de descendentes para a próxima geração, com uma probabilidade determinada pelo seu índice de adaptação. Por outras palavras, os indivíduos com maior capacidade de adaptação têm maiores probabilidades de se reproduzir.

O ponto de partida para a utilização de Algoritmos Genéticos, como ferramenta para solucionar problemas, consiste na representação destes problemas de forma que os Algoritmos Genéticos possam trabalhar adequadamente sobre eles.

Tradicionalmente, os indivíduos são representados de forma genotípica utilizando vectores binários, onde cada elemento de um vector denota a presença (1) ou ausência (0) de uma determinada característica: o seu genótipo. Os elementos podem ser combinados formando as características reais do indivíduo, ou o seu fenótipo.

Teoricamente, esta representação é independente do problema, pois uma vez encontrada a representação em vectores binários, podem ser utilizadas as operações padrão, facilitando o seu emprego em diferentes classes de problemas.

O princípio básico do funcionamento dos AGs consiste num critério de selecção que permitirá que, depois de muitas gerações, o conjunto inicial de indivíduos gere indivíduos mais aptos. A maioria dos métodos de selecção é projectada para escolher preferencialmente indivíduos com melhores capacidades de adaptação, embora não exclusivamente, a fim de manter a diversidade da população.

Nestas condições é necessário dispor de um conjunto de operações para que, dada uma população, se consiga gerar populações sucessivas que (espera-se) melhorem a sua capacidade de adaptação com o tempo. Estes operadores são: cruzamento (*crossover*) e mutação. Estes são utilizados para assegurar que a nova geração seja diferente, mas possuindo, de alguma forma, características dos seus pais, ou seja, a população diversifica-se mas mantém características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores. Para prevenir que os melhores indivíduos não desapareçam da população devido à manipulação dos operadores genéticos, estes

podem então ser automaticamente colocados na próxima geração, através da reprodução Elitista. Este ciclo é repetido um determinado número de vezes.

De seguida é apresentada uma implementação de um Algoritmo Genético.

### **Algoritmo Genético**

#### **Início**

```
t = 0;  
inicia_população (P,t);  
avaliação (P,t);
```

#### **Repetir até (t = d)**

##### **Início**

```
t = t + 1;  
selecção_dos_pais (P,t);  
recombinação (P,t);  
mutação (P,t);  
sobrevivem (P,t)
```

##### **Fim**

#### **Fim**

Neste algoritmo:

- t – tempo actual;
- d – tempo determinado para terminar o algoritmo;
- P – população.

Estes algoritmos, apesar de serem computacionalmente muito simples, são bastante poderosos.

### **3.5.3 Como Funcionam os AGs**

#### **3.5.3.1 Adaptabilidade ou Adequabilidade**

É o resultado da função de avaliação (  $a()$  ), que traduz o nível de adaptação do indivíduo relativamente ao ambiente.

#### **3.5.3.2 Processo de Selecção**

O seguinte tipo de selecção é denominado como torneio estocástico.

Calcula-se o valor de adaptabilidade  $a(v_i)$  para cada cromossoma  $v_i$  ( $i=1,\dots,T_{pop}$ );

É calculada a adaptabilidade total da população utilizando (3.1).

$$F = \sum a(v_i) \quad (3.1)$$

Calcula-se a probabilidade de selecção  $p_i$  para cada cromossoma  $v_i$  ( $i=1,\dots,T_{pop}$ ) utilizando a expressão (3.2).

$$p_i = a(v_i) / F \quad (3.2)$$

Calcula-se a probabilidade cumulativa  $q_i$  para cada cromossoma  $v_i$  ( $i=1,\dots,T_{pop}$ ) utilizando (3.3).

$$q_i = \sum P_j \quad (3.3)$$

Gera-se um número aleatório  $r$  no intervalo  $[0,1]$ . Se  $r < q_i$  então selecciona-se o primeiro cromossoma ( $v_1$ ). Caso contrário, selecciona-se o  $i$ -ésimo cromossoma  $v_i$  tal que  $q_{i-1} < r \leq q_i$ .

### 3.5.3.3 Operadores Genéticos

O princípio básico dos operadores genéticos consiste em transformar a população através de sucessivas gerações, estendendo a pesquisa até chegar a um resultado satisfatório. Os operadores genéticos são necessários para que a população se diversifique mantendo, no entanto, características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores.

O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida, como é ilustrado em seguida, fornecendo assim meios para introdução de novos elementos na população. Desta forma, a mutação assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de pesquisa nunca será zero, além de contornar o problema de convergência para óptimos locais, pois com este mecanismo altera-se levemente a direcção da pesquisa. O operador de mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação  $P_m$  que assume geralmente um valor reduzido.

Exemplo de mutação:

Antes da Mutação    1 1 1 0 0

Depois da Mutação    1 1 0 0 0

O cruzamento é o operador responsável pela recombinação de características dos pais durante a reprodução, permitindo que as próximas gerações herdem essas características. Este é considerado o operador genético predominante, sendo aplicado com a probabilidade dada pela taxa de *crossover*  $P_c$ , que deve ser mais elevada que a taxa de mutação.

Este operador pode, ainda, ser utilizado de várias formas sendo as mais utilizadas as seguintes:

- Um-ponto: é escolhido um ponto de cruzamento e, a partir deste ponto, as informações genéticas dos pais são trocadas tal como se ilustra no exemplo da Figura 3.4;
- Multi-pontos: consiste numa generalização desta ideia de troca de material genético sendo, neste caso, utilizados muitos pontos de cruzamento;
- Uniforme: não utiliza pontos de cruzamento, mas determina, através de um parâmetro global, qual a probabilidade de cada variável ser trocada entre os pais.

A Figura 3.4 apresenta um exemplo de aplicação do *crossover* um-ponto de acordo com as indicações seguintes:

- São escolhidos dois indivíduos;
- É escolhido um ponto de *crossover*;
- São re combinadas as características, gerando assim dois novos indivíduos.

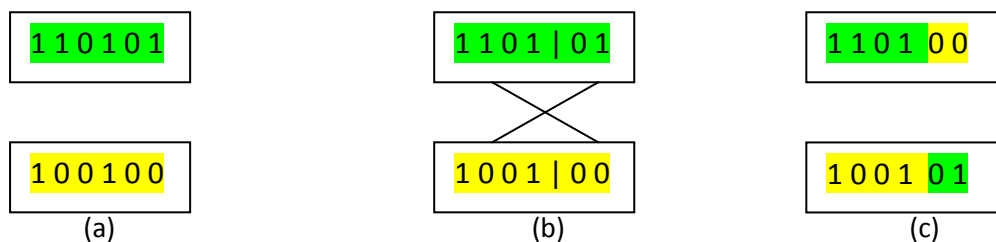


Figura 3.4 – Exemplo de *crossover* um-ponto.

#### 3.5.3.4 Parâmetros Genéticos

É importante analisar de que forma alguns parâmetros influenciam o comportamento dos Algoritmos Genéticos, para que eles possam ser estabelecidos conforme as necessidades do problema e dos recursos disponíveis.

Tamanho da População - o tamanho da população afecta o desempenho global e a eficiência do AG. Com uma população pequena o desempenho pode baixar, pois deste modo a população fornece uma pequena cobertura do espaço de pesquisa do problema. Uma população com muitos indivíduos geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais. No entanto, para se trabalhar com grandes populações são necessários maiores recursos computacionais, ou que o algoritmo funcione por um período de tempo muito maior.

Taxa de Cruzamento - quanto maior for esta taxa, mais rapidamente são introduzidas novas estruturas na população. Mas se esta for muito alta, estruturas com boas capacidades de adaptação poderão ser retiradas mais rapidamente da população, sendo a maior parte da população substituída. Assim, com valores muito altos pode ocorrer perda de estruturas de alta adaptação. Em contrapartida, com um valor baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento.

Taxa de Mutação - uma baixa taxa de mutação permite que uma dada posição não fique estagnada num valor, além de possibilitar que se chegue a qualquer ponto do espaço de pesquisa. Com uma taxa muito alta a pesquisa torna-se essencialmente aleatória.

Intervalo de Geração - controla a percentagem da população que será substituída durante a próxima geração. Com um valor alto, a maior parte da população será substituída, mas com valores muito altos pode ocorrer perda de estruturas de grande adaptação. Com um valor baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento.

### 3.6 PESQUISA DE VIZINHANÇA VARIÁVEL - (*VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH*)

O Método de Pesquisa de Vizinhaça Variável, (*Variable Neighborhood Search*, VNS), (Hansen; Mladenovic, [7]), é um método de pesquisa local que consiste em explorar o espaço de soluções através de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhaça. Contrariamente às outras metaheurísticas baseadas em métodos de pesquisa local, o método VNS não segue uma trajetória mas sim explora vizinhaças gradativamente mais “distantes” da solução corrente e focaliza a procura em torno de uma nova solução se e só se um movimento de melhoria for realizado. O método inclui, também, um procedimento de procura local a ser aplicada sobre a solução corrente.

Mais especificamente, esta metaheurística parte de uma solução inicial qualquer e, em cada iteração, selecciona aleatoriamente um vizinho dentro da vizinhaça  $N_k$  da solução corrente. Esse vizinho é então submetido a um procedimento de pesquisa local. Se a solução óptima local for melhor que a solução corrente, a



procura continua a partir desta, recomeçando da primeira estrutura de vizinhança. Caso contrário, a procura prossegue a partir da próxima vizinhança,  $N_{k+1}$ . Esta metaheurística termina quando for atingida uma condição de paragem, tal como o tempo máximo de processamento ou o número máximo de iterações consecutivas sem melhoramento. Os vizinhos da solução corrente são gerados aleatoriamente de forma a evitar ciclos, situação que pode ocorrer se alguma regra determinística for usada.

Seguidamente é apresentado o algoritmo VNS supondo um problema de minimização.

#### **Algoritmo de Pesquisa de vizinhança**

Passo 1: **Seja**  $S_0$  uma possível solução inicial, **seja**  $k \leftarrow 1$  e  $S \leftarrow S_0$

Passo 2: **Enquanto** (condição não satisfeita) **fazer**

Passo 2.1: **Enquanto** existir  $S' \in N^k(S)$  tal que  $C(S') < C(S)$  **fazer**  
 $S \leftarrow S'$

Passo 2.2: **Fazer**  $k \leftarrow k + 1$  (aumentar a vizinhança  $N^{k+1}(S)$ )

Passo 3: **Fazer**  $S^* \leftarrow S$  e imprimir a melhor solução  $S^*$

Neste algoritmo:

- $S_0$  – solução inicial;
- $S$  – solução com valor mínimo;
- $S'$  – solução actual;
- $N$  – vizinhança;
- $C$  – função de avaliação;
- $S^*$  – solução óptima.

Uma característica das estratégias VNS é o facto de aplicarem aleatoriedade durante a pesquisa local, enquanto as estratégias GRASP aplicam aleatoriedade durante a fase de construção.

### **3.7 COLÓNIAS DE FORMIGAS (*ANT COLONIES*)**

#### **3.7.1 Princípio**

Esta técnica simula o comportamento de um conjunto de agentes que cooperam para resolver um problema de optimização por meio de comunicações muito simples, M.Dorigo [8]. As formigas parecem conseguir encontrar o seu caminho (da colónia para uma fonte de comida e regresso, ou ao redor de um obstáculo) com relativa

facilidade. Diversos estudos permitiram descobrir que esta capacidade é o resultado da comunicação química entre as formigas através de ferómonas e um fenómeno emergente causado pela presença de muitas formigas.

O algoritmo Colónia de Formigas evolui de forma genérica, da seguinte forma:

- Em todos casos as formigas escolhem, usando uma regra probabilística, um ponto ou nó ainda não visitado;
- A probabilidade de escolher o nó  $(i,j)$  é directamente proporcional à quantidade  $\tau_{ij}$  de ferómonas no nó  $(i,j)$ ;
- As formigas recordam-se de todos os nós visitados;
- Depois de uma excursão ter sido completada, as formigas colocam um rasto positivo  $\Delta\tau_{ij}$  em cada nó  $(i,j)$  da trajectória ( $\Delta\tau_{ij} = 0$  para os nós que não foram incluídos na trajectória).

Dado que os valores iniciais de  $\tau_{ij}$  são constantes para todos os nós, inicialmente as formigas são livres para se moverem aleatoriamente. Se consideramos  $M$  formigas que se movem num grafo simultaneamente,  $\tau_{ij}$  é o caminho pelo qual as formigas comunicam. As formigas escolhem com maior probabilidade nós com maiores quantidades de ferómonas. Então, as formigas deixam rastos nos nós fazendo-os mais desejáveis para outras formigas. O algoritmo da colónia de formigas pode ser considerado como a superposição simultânea de  $M$  procedimentos individuais de formigas.

De seguida é apresentado o algoritmo referente ao método Colónia de Formigas.

#### **Algoritmo – Colónia de formigas**

Passo 1: **Seja**  $Q$  e  $\tau_0$  constantes, e **fazer**  $C(S^*) \leftarrow \infty$ ;

Passo 2: **Fazer**  $\Delta\tau_{ij} \leftarrow 0$  e  $\tau_{ij} \leftarrow \tau_0$  **para todos** nós  $(i,j)$ ;

Passo 3: **Para** cada formiga  $k = 1, 2, \dots, M$  **Fazer**

Seleccionar o nó inicial de qual a formiga  $k$  parte

Obter uma trajectória  $T^k$  para cada formiga  $k$  de acordo com o procedimento seguido por cada formiga individualmente

**Seja**  $L^k$  a duração da trajectória  $T^k$

**Se**  $L^k < C(S^*)$ , **então**

$S^* \leftarrow T^k$ ;

**Calcular** a quantidade do rasto deixado pela formiga  $k$  como:

$\Delta\tau_{ij}(k) = Q / L^k$ , se o nó  $(i,j)$  pertencer à trajectória  $T^k$ ,

**Caso contrário**  $\Delta\tau_{ij}(k) = 0$

Fazer  $\Delta\tau_{ij} \leftarrow \Delta\tau_0 + \Delta\tau_{ij}(k)$

Passo 4: **Se** a melhor trajectória  $S^*$  não mudou até o último  $N_{\max}$  global de iterações, **então** parar com  $S^*$  como a melhor solução encontrada

### **Caso contrário**

Voltar ao passo 2.

Neste algoritmo:

- Q – comprimento total da trajectória;
- $\tau_{ij}$  – valor de ferómonas no nó(i,j);
- T – trajectória;
- L – duração da trajectória;
- C – função avaliação;
- S\* – solução óptima.

Cada formiga, se não considerasse o rasto de ferómonas deixadas por ela mesma relativamente à trajectória que efectua, movimentar-se-ia com uma regra probabilística ambiciosa local, que provavelmente conduziria a uma má solução final. Se consideramos o efeito da presença simultânea de muitas formigas, então cada uma contribui com uma parte da distribuição do rasto de ferómonas. Bons conjuntos de nós serão então seguidos por muitas formigas e que assim, receberão uma grande quantidade de ferómonas que lhes indicará quais os melhores nós para desta forma seguirem uma boa trajectória.

### **3.7.2 Comentários**

O comportamento do modelo computacional não é muito semelhante ao modelo de colónias naturais de formigas (por exemplo, as formigas reais deixam o rasto de ferómonas durante o seu movimento, e não depois de alcançar o seu destino final).

Tal como, os algoritmos genéticos as colónias de formigas estão também baseados numa população de agentes, e não só num único agente (solução).

## **3.8 *SIMULATED ANNEALING***

O *Simulated Annealing* [9-10] é baseado nos resultados da termodinâmica. Como o próprio nome indica, o algoritmo *Simulated Annealing* explora uma analogia entre o modo como um metal arrefece e tende para uma estrutura cristalina de energia mínima e a procura por um mínimo num sistema qualquer.

O *Simulated Annealing* (SA) é usualmente referido como a mais antiga das metaheurísticas e é seguramente um dos primeiros algoritmos a incorporar uma estratégia clara para evitar mínimos locais. As origens deste algoritmo encontram-se na mecânica estatística (algoritmo de Metropolis) e este foi primeiro apresentado como um algoritmo de pesquisa para problemas combinatórios por Kirkpatrick [10]. A ideia fundamental é a de permitir que a pesquisa possa evoluir para soluções de pior qualidade do que a solução actual, a fim de escapar de óptimos locais. Neste algoritmo a probabilidade de fazer um tal movimento é diminuída à medida que a procura é realizada.

### 3.8.1 Analogia

O princípio base do *Simulated Annealing* está relacionado com a seguinte observação física do comportamento da matéria. Consideremos que um material é levado à sua temperatura de fusão. Então as suas moléculas ficam num estado muito desordenado e agitam-se livremente como é ilustrado na Figura 3.5.

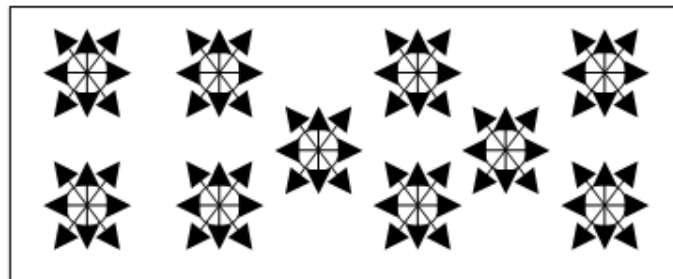


Figura 3.5 - Estado desordenado das moléculas da matéria em fusão.

Se arrefecermos bruscamente a amostra, o nível de energia baixa rapidamente e as moléculas vão encontrar-se num estado ainda muito desordenado no qual o nível de energia é muito superior ao de um cristal perfeito. Este estado, dito amorfo, está representado na Figura 3.6 e é menos estável que o estado ordenado da Figura 3.7.

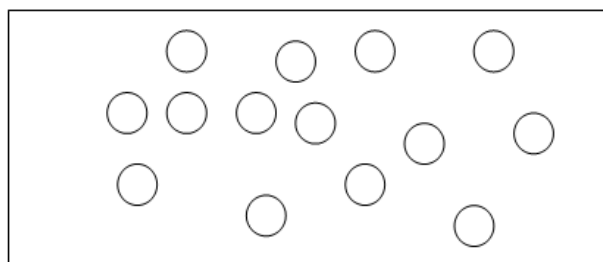


Figura 3.6 - Estado desordenado das moléculas devido a um arrefecimento rápido.

Contrariamente, se arrefecermos a amostra de forma lenta e gradual, as moléculas adquirem uma estrutura cristalina estável que tem um nível de energia mais reduzido como representado na Figura 3.7.

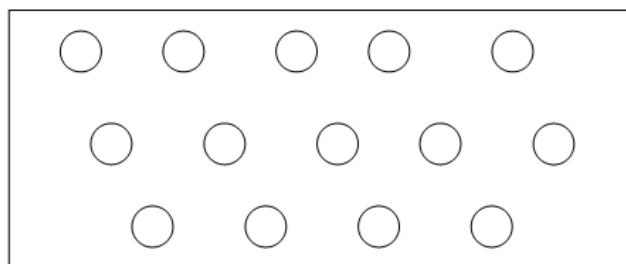


Figura 3.7 - Estado ordenado das moléculas devido a um arrefecimento lento.

### 3.8.2 Aplicação à otimização, algoritmo de Metropolis

A analogia com um problema de optimização é bastante directa. Tal analogia pode ser realizada da seguinte forma:

- As **soluções** ou **alternativas** do problema de optimização têm equivalência nos diferentes **estados** do sistema;
- O **custo** ou **avaliação** de cada solução têm equivalência na **energia** associada aos estados;
- O **parâmetro de controlo** de aceitação de soluções tem equivalência no **parâmetro temperatura**.

Esta meta-heurística foi pela primeira vez apresentada por Kirkpatrick [10] com base no algoritmo de Metropolis desenvolvido em 1953 [11]. Este autor apresentou uma simulação eficiente do comportamento de um conjunto de átomos em equilíbrio a uma temperatura fixa e construiu uma teoria consistente considerando as leis da física do estado sólido e a analogia entre os processos termodinâmicos e respectivas leis físicas, em sistemas constituídos por muitas partículas. Kirkpatrick generalizou a abordagem e aplicou-a a problemas possuindo carácter combinatório.

O processo de Metropolis é constituído basicamente por duas etapas. Na primeira procede-se à elevação inicial da temperatura até um estado de energia máxima e, na segunda, verifica-se a sua descida sucessiva e suficientemente lenta para que as partículas do sistema se combinem de forma a atingirem o estado de energia mínima, isto é, de tal forma que seja atingido o estado cristalino.

A simulação da evolução das soluções é baseada em técnicas de Monte Carlo e na geração de estados sucessivos. Supõe-se como ponto de partida um estado possuindo energia  $E_i$  a partir do qual, recorrendo a um mecanismo apropriado, é

gerado um outro estado com energia  $E_j$ . Se a diferença de energias  $E_j - E_i$  for inferior ou igual a zero, o novo estado é aceite como estado actual. Se a condição anterior não se verificar, o novo estado poderá ser ainda aceite com uma probabilidade função da diferença de energias entre estados sucessivos e da temperatura. A expressão (3.4) permite calcular esta probabilidade.

$$p = e^{\left(\frac{E_i - E_j}{K_B T}\right)} \quad (3.4)$$

Nesta expressão:

- T – temperatura;
- $K_B$  – constante de Boltzman.

O processo de arrefecimento simulado tem a particularidade de permitir o relaxamento transitório da condição de optimalidade durante o processo de pesquisa. Este relaxamento é admitido na tentativa de evitar a convergência para óptimos locais. Esta situação encontra-se ilustrada na Figura 3.8.

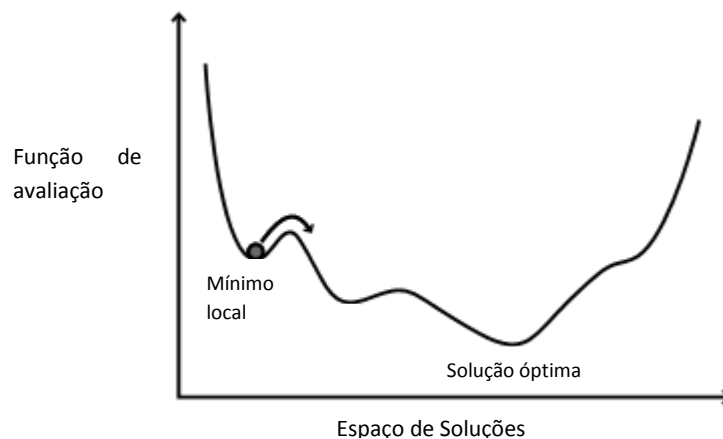


Figura 3.8 – Funcionamento do algoritmo de *Simulated Annealing* ilustrando a forma de escapar de óptimos locais.

De seguida é apresentado o algoritmo de Metropolis.

### **Algoritmo Metropolis**

#### **Início**

Passo 1: Estabelecer uma solução viável  $S^0$

Passo 2:  $S \leftarrow S^0$ ;

Passo 3: Escolher uma temperatura inicial  $T > 0$ ;

Passo 4: **Enquanto** o sistema não estiver totalmente arrefecido **Fazer**

Efectuar  $L$  iterações de:

Escolher aleatoriamente uma solução vizinha  $S'$

$$\Delta = f(S') - f(S)$$

**Se  $\Delta < 0$  então**

$S \leftarrow S'$ ;

**Se  $f(S') < f(S^*)$  Então**

$S^* \leftarrow S'$ ;

**Senão**

$S \leftarrow S'$  com probabilidade  $e^{-\Delta/T}$

**Fim da pesquisa interna;**

Reduzir a temperatura  $T$ ;

**Fim do Enquanto;**

**Fim**

Neste algoritmo:

- $S_0$  – solução inicial;
- $S$  – solução corrente;
- $S'$  – solução vizinha;
- $S^*$  – solução óptima;
- $T$  – temperatura;
- $\Delta$  – diferença entre as diferentes funções de avaliação.

Este algoritmo decompõe-se em duas grandes pesquisas sobrepostas. A pesquisa externa controla a finalização do processo sendo baseada na noção do estado arrefecido que será referido de novo mais tarde. A pesquisa interna contém o processo de optimização. Para uma temperatura fixa, explora-se a vizinhança aceitando ou não os movimentos que nos são apresentados. Ao fim de  $L$  iterações, diminui-se a temperatura. Notemos que na maioria das implementações o valor de  $L$  é adaptado ao contexto.

No decorrer de uma iteração interna escolhe-se aleatoriamente um elemento  $V$  no centro da vizinhança da solução corrente  $S$ . Se  $V$  é um vizinho melhor, ou seja, a função de avaliação em  $V$  é inferior ao da função avaliação em  $S$ , então  $V$  é aceite como nova solução corrente. Pelo contrário, se a passagem de  $S$  para  $V$  piora a função de avaliação, aceitaremos o movimento com uma probabilidade que depende da diferença das funções de avaliação e da temperatura corrente. Este corresponde ao mecanismo de aceitação condicional de novas soluções que permitem sair dos óptimos locais.

O mecanismo probabilístico de exploração do espaço das soluções é equivalente ao percurso de uma cadeia de Markov em que os estados constituem as

soluções possíveis do problema, correspondendo as transições aos movimentos de uma solução possível para outra (muito dependente da vizinhança). Estas transições são dotadas de probabilidades dependentes da evolução da função de avaliação e da temperatura.

Quando a temperatura é elevada, praticamente todos os movimentos serão autorizados como no caso da matéria em fusão onde a energia do sistema é muito elevada. Quanto mais baixa for a temperatura, mais penalizadas serão as degradações da função de avaliação pelo que o algoritmo tenderá a convergir para o óptimo local mais próximo.

Definamos agora o estado chamado arrefecido de um problema combinatório. Considera-se que o problema está no seu estado arrefecido se não for possível encontrar uma solução melhor mesmo continuando a pesquisa. Dispõe-se de inúmeros critérios para tomar esta decisão. Um dos mais utilizados consiste em parar o algoritmo desde que não se efectue mais que um certo número  $n$  de iterações a uma determinada temperatura sem melhorar o melhor valor obtido para a função de avaliação.

O algoritmo começa por gerar uma solução inicial (seja aleatoriamente ou através de uma heurística) e por inicializar o parâmetro temperatura,  $T$ . A partir da solução base é gerado um conjunto de soluções vizinhas a partir do qual será escolhida a nova solução. Em seguida, o seguinte processo repete-se sucessivamente até que seja atingido o critério de paragem: é gerada aleatoriamente uma solução  $S'$  na vizinhança  $N(S)$  da solução  $S$  e aceita-se como nova solução actual, em função de  $f(S)$ ,  $f(S')$  e  $T$ . Então, sendo o problema de minimização,  $S'$  substitui  $S$  se:

$$f(S') < f(S) \quad (3.5)$$

Se se verificar a situação contrária, a nova solução pode ainda ser aceite dependendo da probabilidade de aceitação, geralmente calculada a partir da expressão (3.6)

$$e^{\frac{-(f(S')-f(S))}{T}} \quad (3.6)$$

A temperatura  $T$  é diminuída ao longo do processo de pesquisa. Assim, no início da pesquisa a probabilidade de aceitação é mais alta diminuindo gradativamente, convergindo para um simples algoritmo iterativo de melhoria.



Para uma melhor compreensão do algoritmo na Figura 3.9 é ilustrado o seu fluxograma.

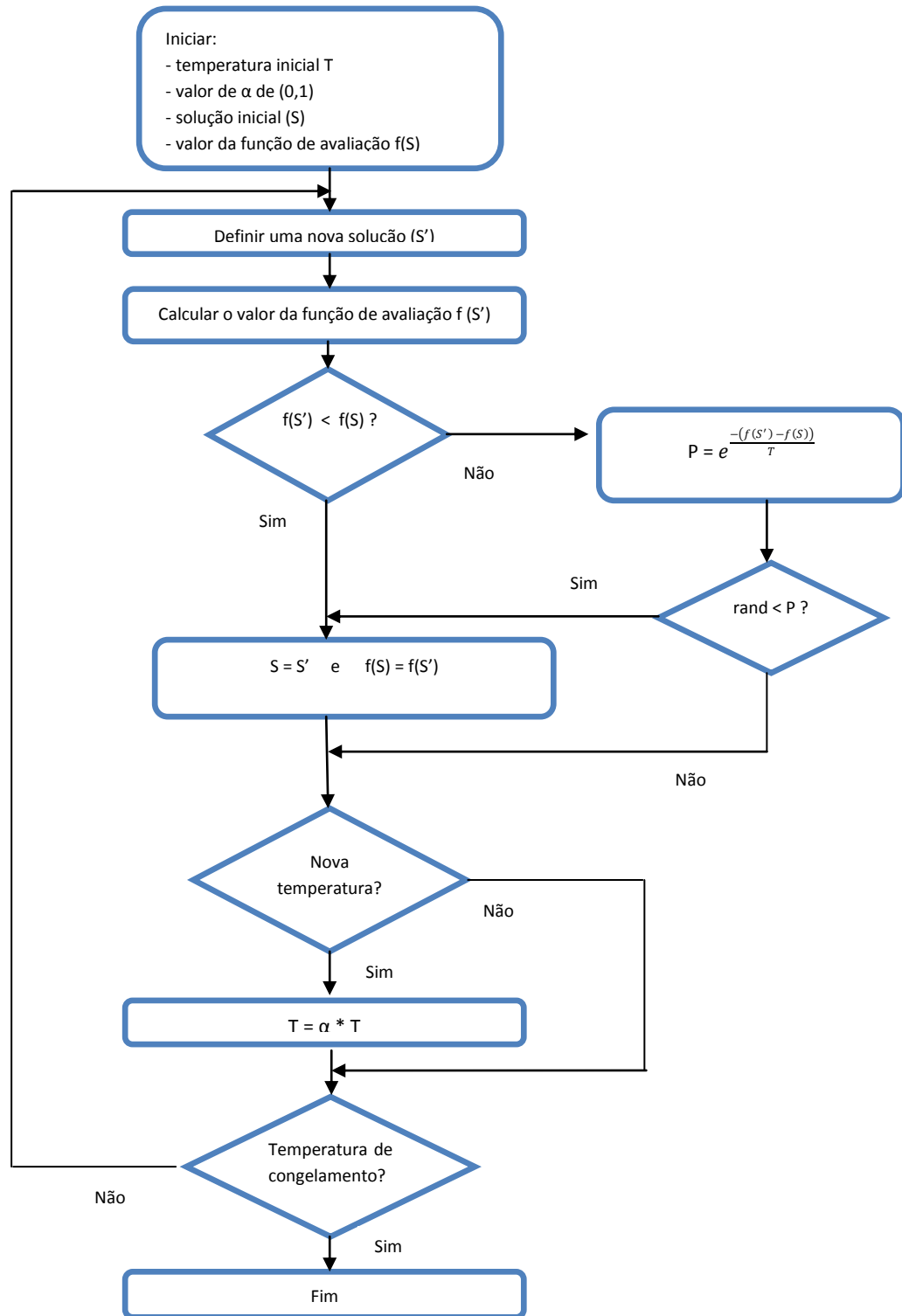


Figura 3.9 – Fluxograma *Simulated Annealing*.

### 3.8.3 Comentários

Os métodos estocásticos são muito cativantes pois estes têm à sua disposição teoremas de convergência. Além disso, estes revelam-se sempre em condições de escolher convenientemente a vizinhança pelo que se encontram entre os métodos mais utilizados para a resolução de problemas de optimização combinatória.

A maior vantagem do *Simulated Annealing* em relação a outros métodos, resulta da possibilidade de evitar mínimos locais, particularmente nos casos em que as técnicas tradicionais de optimização falham: o algoritmo emprega, para isso, uma pesquisa aleatória que, por vezes, aceita vizinhos cuja energia seja mais elevada. Ou seja, em algumas iterações, o *Simulated Annealing* aceita degradar a função de avaliação em vez de a reduzir. Entretanto, uma característica importante deste algoritmo está associada ao facto da probabilidade de se aceitar um vizinho de maior energia decresce com o tempo, o que se implementa com um parâmetro, a temperatura, que decresce ao longo do processo iterativo.

### 3.8.4 Projectos existentes utilizando esta técnica

De seguida será apresentado um projecto utilizando *Simulated Annealing* para a sua resolução com o que se pretende ilustrar a aplicação prática desta metaheurística. O problema está descrito em [12] e consiste na identificação de estratégias optimizadas de exploração de redes de distribuição de energia eléctrica, utilizando aqui a analogia entre o problema combinatório e o processo de Metropolis. Assim:

- as combinações possíveis de tomadas de transformadores e de baterias de condensadores do problema combinatório são equivalentes aos diferentes estados dos sistemas de muitas partículas e constituem o espaço das soluções;
- a função de aceitação é equivalente à energia dos diferentes estados. Neste problema a função de aceitação corresponde à soma pesada das perdas activas, e de funções de penalidade. Estas, por seu lado, dependem da violação de limites da intensidade de corrente em ramos da rede e de violações das gamas de variação admitidas para o módulo da tensão nos barramentos;
- o parâmetro de controlo que regula a aceitação de piores soluções é equivalente à temperatura.

A solução inicial corresponde, por defeito, a um nivelamento das tomadas dos transformadores e à colocação fora de serviço das secções de baterias de

condensadores. A partir desta solução base é gerada uma vizinhança que inclui todas as combinações possíveis resultantes da modificação, para cima ou para baixo, de um grau das tomadas dos transformadores ou da secção de baterias de condensadores.

A escolha das soluções é resultante de um sorteio no conjunto dos vizinhos, associado a um critério de selecção sendo a aceitação determinada por uma probabilidade de aceitação,  $P(\text{aceitação})$ . A nova solução é aceite se for melhor que a anterior e, sendo pior, mediante uma determinada probabilidade tal como se apresenta na equação (3.7). O processo repete-se sucessivamente até que se atinja o critério de paragem.

Solução  $i$  – solução inicial.

Solução  $j$  – solução nova.

$$P_{(\text{aceitação})} = \begin{cases} 1 & \text{se } f(j) < f(i) \\ e^{\frac{f(i)-f(j)}{K.T}} & \text{se } f(j) \geq f(i) \end{cases} \quad (3.7)$$

De notar que, atendendo à forma como é conduzido o método de pesquisa em que a  $P(\text{aceitação})$  depende da função de avaliação, não existe qualquer dificuldade em considerar funções não lineares. A necessidade de linearização das funções objectivo para facilitar a resolução deste tipo de problemas deixa de fazer sentido.

#### 3.8.4.1 Decisões Gerais e Decisões Específicas

Procedimentos gerais são aqueles que têm a ver com o escalonamento do abaixamento sucessivo da temperatura. O processo de arrefecimento do *Simulated Annealing* consiste em: (1) definir o valor inicial de temperatura, (2) definir a função de decremento, (3) fixar o número de iterações a realizar para cada nível de temperatura e por fim (4) definir a temperatura mínima.

(1) Assim, a temperatura inicial ou parâmetro de controlo ( $T_0$ ) não deve ser demasiado baixa para evitar a convergência para óptimos locais, nem demasiado elevada por forma a evitar tempo de cálculo excessivo. O equilíbrio entre estes dois aspectos revela-se importante dado que os estudos de optimização da exploração de redes de distribuição de energia eléctrica deverão permitir obter respostas de forma rápida.

(2) Por outro lado o número de iterações (que equivale ao tempo durante o qual a temperatura é mantida constante) é especificado tendo como base experiências relatadas na literatura ou de problemas cujo controlo dos resultados seja um facto. O número de possíveis vizinhos é calculado à partida simultaneamente com o cálculo da temperatura inicial. Mais uma vez este valor depende da dimensão do problema e da precisão com que se pretende obter a solução final.

(3) A forma de reduzir a temperatura deve ser escolhida de modo a conduzir a menores tempos de cálculo para idêntica qualidade nos resultados. O parâmetro  $\beta$  da expressão (3.8) define a função de decréscimo da temperatura.

$$T_i = \beta^i \times T_0 \quad (3.8)$$

(4) Finalmente, o ponto de energia mínima ou de paragem do processo deve ser fixado de forma que, para um determinado nível de temperatura, o número de vezes em que foram aceites novas soluções seja inferior a um valor pré-especificado. O limite consiste em pelo menos uma solução ser aceite numa sequência de iterações ou então a temperatura atingir um valor mínimo fixado inicialmente.

Por outro lado, constituem decisões específicas a estrutura de vizinhança e a avaliação das alternativas ou soluções.

A Estrutura da vizinhança é gerada por um mecanismo de pesquisa que elimina as soluções não admissíveis do espaço de soluções. Este procedimento consiste na construção do conjunto de todas as combinações possíveis de posições das tomadas de transformadores e de secções de baterias de condensadores em exploração, obtidos por alteração de uma posição em relação à situação actual.

A avaliação das alternativas que são encontradas ao longo do processo de pesquisa é realizada através da função de avaliação. Na aplicação em análise este é um processo simples que se realiza com recurso a um módulo auxiliar que permite resolver o problema de Trânsito de Potências de modo a avaliar valor das perdas por efeito de Joule, o valor das tensões e as intensidades de corrente nos ramos para a solução em questão.

### 3.8.4.2 Formulação Matemática do Problema

O problema de minimização da potência activa de perdas pode ser formulado por (3.9) a (3.14):

$$\min z = \sum_{nr} g_{ij} \cdot (V_i^2 + V_j^2 - 2 \cdot V_i \cdot V_j \cdot \cos \theta_{ij}) \quad (3.9)$$

$$\text{suj.} \quad h(V, \theta, t_f, e_c) = 0 \quad (3.10)$$

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max} \quad \text{para cada nó} \quad (3.11)$$

$$|I_{ij}| \leq |I_{ij}|^{\max} \quad \text{para cada ramo} \quad (3.12)$$

$$t_f \in \{t_{f1}, t_{f2}, t_{f3}, \dots\} \quad \text{para cada transformador com tomadas} \quad (3.13)$$

$$e_c \in \{e_{c1}, e_{c2}, e_{c3}, \dots\} \text{ para cada bateria de condensadores} \quad (3.14)$$

Nesta formulação:

- $h$  - representa as equações do problema de trânsito de potências;
- $t_f$  - representa um dos valores disponíveis de tomadas de transformadores;
- $e_c$  - representa um dos valores disponíveis de secções de baterias de condensadores;
- $V$  e  $\theta$  - representam o módulo e a fase da tensão em cada barramento da rede;
- $g_{ij}$  - corresponde à condutância do ramo  $ij$ ;
- $|I_{ij}|$  - representa o módulo da intensidade de corrente no ramo  $ij$ .

Tradicionalmente este problema foi resolvido considerando, numa primeira aproximação, que as tomadas dos transformadores e as secções em serviço das baterias de condensadores são representadas por variáveis contínuas. O problema assim modificado corresponde a um problema de optimização não linear que pode ser resolvido, por exemplo, pelo método do gradiente. A solução obtida desta forma é, finalmente, aproximada para a solução discreta mais próxima. Esta estratégia de solução apresenta diversos inconvenientes. Por um lado, o método do gradiente poderá convergir para óptimos locais além de poder necessitar de um número elevado de iterações. Por outro lado, o problema original é inteiro pelo que a solução final encontrada não corresponderá, em geral, ao óptimo.

A aplicação desenvolvida utiliza o *Simulated Annealing* para identificar uma estratégia que permita minimizar a potência activa de perdas. Apresenta-se em seguida o algoritmo adoptado:

- i. Executar um estudo inicial de trânsito de potências assumindo uma posição inicial para as tomadas dos transformadores e para as secções de baterias de condensadores em exploração;
- ii. Considerar a solução inicial identificada no estudo anterior como solução corrente ( $x^{\text{corrente}}$ ) e como solução óptima corrente ( $x^*$ ). Cada solução é caracterizada pelo valor global da potência de perdas por efeito de Joule, tensões em módulo e fase nos barramentos, tomadas de transformadores e secções de baterias de condensadores em exploração;
- iii. Caracterizar a qualidade da solução corrente calculando o valor da função de avaliação ( $F(x^{\text{corrente}})$ );

Atribuir o valor  $F(x^{\text{corrente}})$  a  $F(x^*)$ ;

Inicializar o contador de iterações  $n$  em 1;

Inicializar o contador de soluções de pior qualidade que a corrente, ContaPior, em 0;

Inicializar o parâmetro Temperatura na temperatura inicial igual a 1.0;

O valor da função de avaliação para uma solução genérica  $x$  caracterizada pelo valor das grandezas referidas em cima é dado por:

$$F(x) = \text{PerdasActivas} + \sum_{\text{todos os nós}} (V_{\text{mag}_i} - V_i^{\text{max}}) \cdot f_1(V_{\text{mag}_i}) + \sum_{\text{todos os nós}} (V_i^{\text{min}} - V_{\text{mag}_i}) \cdot f_2(V_{\text{mag}_i}) + \sum_{\text{todos os ramos}} \left( \frac{I_i - I_i^{\text{max}}}{I_i^{\text{max}}} \right) \cdot f_3(I_i) \quad (3.15)$$

$$f_1(V_{\text{mag}_i}) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } V_{\text{mag}_i} \leq V_i^{\text{max}} \\ \text{PerdasActivas} & , \text{ se } V_{\text{mag}_i} > V_i^{\text{max}} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$f_2(V_{\text{mag}_i}) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } V_{\text{mag}_i} \geq V_i^{\text{min}} \\ \text{PerdasActivas} & , \text{ se } V_{\text{mag}_i} < V_i^{\text{min}} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$f_3(I_i) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } I_i \leq I_i^{\text{max}} \\ \text{PerdasActivas} & , \text{ se } I_i > I_i^{\text{max}} \end{cases} \quad (3.18)$$

- iv. Identificar uma solução na vizinhança da solução corrente ( $x_n$ ). Esta identificação é realizada seleccionando de forma aleatória um transformador ou banco de capacidades no qual a tomada ou secção respectiva em exploração são modificadas de uma unidade;
- v. Executar um estudo de Trânsito de Potências para esta nova solução  $x_n$  e calcular o valor da função de avaliação  $F(x_n)$  utilizando a expressão (3.15);
- vi. Actualizar os valores da solução óptima corrente e da solução corrente considerando:

**Se**

$$F(x_n) \leq F(x^*) \quad \text{então}$$

atribuir  $x_n$  a  $x^*$  e a  $x^{\text{corrente}}$

colocar ContaPior em 0

**senão**

obter um número aleatório p

$$p(\text{patamar } s) = \exp\left(\frac{F(x^{\text{corrente}}) - F(x_n)}{0.00025 \times \text{temperatura}}\right) \quad (3.19)$$

Se  $p \leq p(\text{patamar } s)$  então atribuir  $x_n$  a  $x^{\text{corrente}}$

incrementar o valor de ContaPior;

- vii. **Se** ContaPior > número máximo de iterações sem melhoria então ir para ix)
- viii. **Se** n > número máximo de iterações por nível de temperatura então  
colocar temperatura = ritmo de arrefecimento \* temperatura  
se temperatura < temperatura final então ir para ix)  
colocar n em 1;  
**senão** incrementar n para n+1;  
**ir** para iv);
- ix. **Fim.**

De acordo com este algoritmo, a avaliação da qualidade de uma solução é realizada calculando o valor global da potência activa de perdas na rede e integrando parcelas representando penalidades associadas a violações da gama de valores admitidos para o módulo das tensões e a violações de limites de intensidades de corrente em ramos da rede. Em qualquer destas duas situações, assume-se que os valores do módulo das tensões e da intensidade de corrente se encontram em pu correspondendo a penalidade atribuída ao valor corrente da potência de activa de perdas.

De salientar que este algoritmo foi testado em duas redes diferentes:

- Rede A – Rede com 24 barramentos/36 ramos do IEEE;
- Rede B – Rede baseada numa rede de distribuição portuguesa com 645 barramentos.

## REDE A

Em seguida serão apresentados os resultados obtidos para esta rede. Dos 36 ramos, 31 correspondem a linhas e 5 a transformadores. No teste realizado considerou-se que cada transformador possuía 11 tomadas, podendo o valor da tomada variar entre 0.95 e 1.05 com um incremento de 0.01. As tomadas dos

transformadores encontravam-se inicialmente na posição nominal (posição 6 a que corresponde o valor de 1.0).

Os parâmetros do *Simulated Annealing* para este exemplo relacionados com a temperatura são os seguintes:

- o número de iterações a realizar para a mesma temperatura é de 25;
- a temperatura inicial é de 1.0, diminuindo de 95% de cada vez;
- o número de iterações que é possível realizar sem haver melhoria da função de aceitação é de 75.

Com estes parâmetros o algoritmo realizou 312 iterações, tendo a temperatura diminuído até ao valor de 0,54, conseguindo-se um valor para a função objectivo de 137916,45. Em relação ao valor da função de aceitação para a solução inicial obteve-se uma melhoria de 1196,04.

Na Figura 3.10 apresenta-se a evolução do valor da função de aceitação para a solução actual identificada ao longo do processo de pesquisa (representada através de linha contínua no gráfico) e para a melhor solução encontrada até essa iteração (representada através de uma linha a tracejado no gráfico).

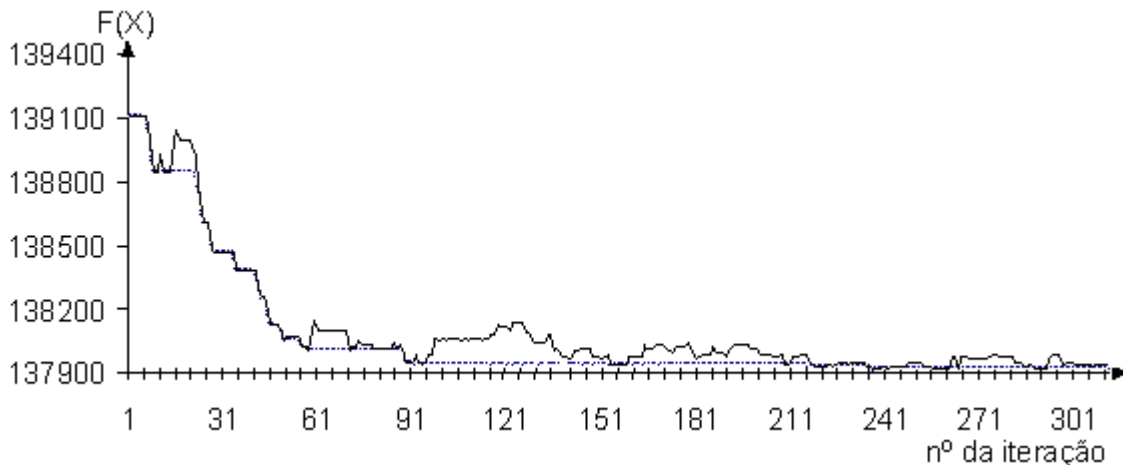


Figura 3.10 – Evolução da função de aceitação para a solução actual de pesquisa (traço contínuo) e para o melhor valor encontrado (a tracejado) na rede com 24 barramentos.

## REDE B

Neste ponto apresentam-se os resultados obtidos para a rede B baseada numa rede de distribuição portuguesa possuindo 645 barramentos. Nesta rede consideraram-se 4 transformadores com 21 tomadas no primário, podendo o valor da tomada variar entre 0.85 e 1.15 com um incremento de 0.015, um transformador com



19 tomadas no secundário, podendo o valor da tomada variar entre 0.85 e 1.15 com um incremento de 0.0167. As tomadas dos transformadores estavam inicialmente na posição nominal. Consideraram-se ainda 4 baterias de condensadores possuindo cada uma dois valores possíveis de injeção de potência reactiva correspondentes às posições de ligada e desligada. Inicialmente estas 4 baterias encontravam-se ligadas. Com estas tomadas e as baterias neste estado, obteve-se o valor inicial da função de aceitação de 825,83.

Os parâmetros do *Simulated Annealing* para este exemplo relacionados com a temperatura são os seguintes:

- o número de iterações que é possível realizar para a mesma temperatura é de 45;
- a temperatura inicial é de 1,0, diminuindo de 95% de cada vez;
- o número de iterações que é possível realizar sem haver melhoria da função de aceitação é de 135.

Com estes parâmetros o algoritmo realizou 256 iterações, tendo a temperatura diminuído até ao valor de 0,77. A função de aceitação assume então o valor de 741,19, o que corresponde a uma melhoria de 84,64 em relação à solução inicial.

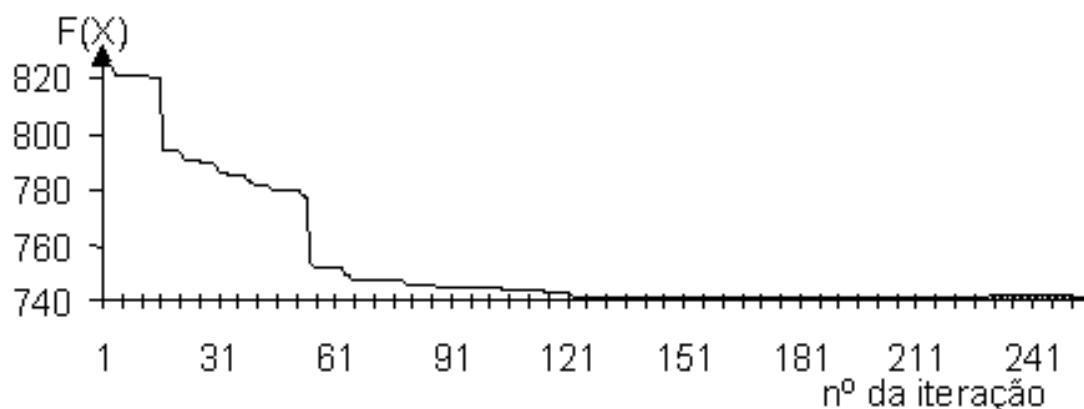


Figura 3.11 – Evolução da função objectivo para a solução actual de procura (a traço contínuo) e para o melhor valor encontrado (a tracejado) na rede com 645 barramentos.

Na Figura 3.11 apresenta-se a evolução da função de aceitação para a solução actual de procura (linha contínua no gráfico) e para a melhor solução encontrada até essa iteração (linha a tracejado no gráfico). Nesta representação gráfica as duas linhas quase coincidem. Esta situação é explicada atendendo à dimensão do gráfico dado que a solução actual se alterou durante todo o processo 143 vezes contra as 38 melhorias registadas na melhor solução identificada.

Para concluir, tendo em vista avaliar a performance do algoritmo relativamente à sua capacidade para identificar o óptimo global foram testadas todas as combinações possíveis associadas às posições das tomadas dos transformadores existentes na rede teste de 24 barramentos/36 ramos. Recorde-se que nesta rede existiam 5 transformadores possuindo cada um deles 11 tomadas. Isto significa que este processo de enumeração exigiu a resolução de 161051 estudos de Trânsito de Potências. Como conclusão, assinala-se que a solução identificada pelo algoritmo baseado no *Simulated Annealing* coincide com a solução identificada pelo processo de enumeração. Este aspecto é tanto mais relevante se se considerar que o processo de enumeração exige a resolução de 161051 estudos de Trânsito de Potências e o algoritmo baseado no *Simulated Annealing* realizou apenas 312 estudos deste tipo. Assim, se o tempo de resolução de um estudo de Trânsito de Potências for considerado a unidade de tempo, pode verificar-se que o tempo de cálculo diminui para 0,19% do que seria necessário pelo processo de enumeração.

No caso da rede possuindo 645 barramentos revela-se impraticável realizar o mesmo tipo de análise por enumeração. Com efeito, essa possui 4 transformadores com 21 tomadas e 1 com 19 tomadas, bem como 4 baterias de condensadores, cada uma delas com duas posições possíveis. Esta situação conduz a 59122224 combinações possíveis, isto é, à necessidade de realizar 59122224 estudos de Trânsitos de Potência. Se o tempo de cálculo de cada estudo deste tipo fosse de 0,1 segundos, esta análise por enumeração demoraria cerca de dois meses a ser completada.

## Capítulo 4

### Metodologia Implementada

#### 4.1 Modelização do Problema

A resolução deste problema consistiu no desenvolvimento de uma ferramenta que realiza a optimização do programa de manutenção de centrais térmicas de modo a evitar a tomada de decisões de forma empírica em relação à calendarização das respectivas manutenções. Pretende-se assim obter soluções optimizadas tendo sempre em conta todas as restrições do problema, havendo todo o interesse em que essa manutenção seja coordenada e seja realizada do modo mais económico possível, garantindo todas as condições de segurança.

A modelização do problema encontra-se de acordo com a referência [13].

Para obter soluções optimizadas foi usada uma técnica englobada nas Metaheurísticas, nomeadamente *Simulated Annealing*.

De seguida será realizada a modelização do problema, sendo apresentadas as principais características do modelo:

1. As centrais térmicas apresentam dois modos de operação:
  - Totalmente disponível;
  - Totalmente indisponível.
2. A capacidade disponível de cada unidade é constante para todos os intervalos fora do período de manutenção.
3. Os estados possíveis de manutenção são os seguintes:
  - Em manutenção;
  - Não está em manutenção.
4. As restrições a considerar são as seguintes:
  - Continuidade da acção de manutenção, ou seja, a manutenção é realizada de uma vez só, sem divisão de período;
  - Condições técnicas para a sua execução;

- Realização de uma operação de manutenção por ano;
  - A carga tem de ser satisfeita;
5. O objectivo do modelo consiste em escolher as datas de início da operação de manutenção para cada grupo produtor tendo em conta a minimização dos custos globais de operação, verificando as restrições e as condições que afectam a produção de energia

## Definições Gerais

- Horizonte temporal

No âmbito da manutenção, o horizonte temporal é discretizado em  $T$  intervalos de tempo,  $t=1, \dots, T$ , cada um com a duração de uma semana, pelo que  $T = 52$ .

Horizonte temporal  $T \rightarrow [1, T]$

$[t^-, t^+] \rightarrow$  Período entre a semana  $t^-$  e a semana  $t^+$ .

- Carga

A carga  $D_{jt}$  é referenciada pela curva de duração de carga, discretizada em  $j$  períodos horários para todo o tempo do intervalo  $t$ . Nesta aplicação foram considerados 5 períodos horários.

## Características do modelo

- Potência hídrica produzida

A potência total hídrica produzida  $H_{jt}$  (Potência turbinada) é naturalmente dependente das condições hidrológicas, no período  $j$  e na semana  $t$ . Nestas condições, é possível obter diferentes políticas de programação de manutenção das unidades de potência térmica, dependendo do estado hidrológico considerado.

- Continuidade da acção de manutenção

Qualquer acção de manutenção com uma dada duração tem de começar numa semana e acabar numa outra sem interrupções.

- Restrições de recursos: Equipas de manutenção

O número de acções de manutenção simultâneas de unidades térmicas do mesmo tipo ou tecnologia tem de ser restringido dado haver, em geral, limitação a nível de equipas de manutenção disponíveis ou a nível de recursos materiais.

- Disponibilidade de cada grupo

A disponibilidade de cada grupo em cada período é modelizada pelo parâmetro  $a_{kj}$ . Este parâmetro permite determinar quais os grupos (ou centrais, tomando em conta os grupos respeitantes a uma mesma central) que são considerados no despacho num determinado período se soubermos antecipadamente que um grupo  $k$  não entra no despacho num certo período  $j$ . Desta forma, poderemos obter resultados mais realistas.

## **4.2 Dados do Problema**

Para a realização deste trabalho foram fornecidos pela EDP Produção valores mensais das cargas, das produções de energia eléctrica por via eólica, outras PRE, hídrica, e obtida por via das interligações. Para completar todos os dados também foram fornecidos os valores das características necessárias respeitantes às centrais bem como os períodos horários e respectivas durações.

## **4.3 Formulação Matemática do Problema**

De seguida será apresentada a formulação matemática do problema indicando-se o significado de todas as variáveis que intervêm no problema.

É necessário antes de mais referir que existem variáveis dependentes e independentes do tempo de acordo com as indicações seguintes:

- Independentes do tempo:
  - $P_k$  – Capacidade nominal de um grupo;
  - $S_k$  – Duração em semanas da acção de manutenção;
  - $t_k$  – Semana de início da acção de manutenção.

- Dependentes do tempo
  - $i_{kt}$  – Estado de operação do grupo  $k$  na semana  $t$ :
    - = 1 em serviço;
    - = 0 fora de serviço, outras razões independentes da acção de manutenção.
  - $m_{kt}$  – Estado de manutenção do grupo  $k$  na semana  $t$ :
    - = 0 em serviço;
    - = 1 em manutenção.
  - $f_{kt}$  – indisponibilidade forçada do grupo  $k$  na semana  $t$ ;
  - $a_{kj}$  – disponibilidade do grupo  $k$  no período  $j$ :
    - = 0 não disponível;
    - = 1 disponível.
  - $V_{rt}^+$  – numero máximo de grupos em simultâneo que a equipa  $V_r$  está habilitada para ter em manutenção.

$T_0 \rightarrow$  Finalmente, o parâmetro  $T_0$ , temperatura do algoritmo de *Simulated Annealing*, deverá de ser suficientemente elevado para prevenir que o algoritmo seja capturado por um óptimo local. No entanto, não deverá ser excessivamente elevado porque se traduziria num tempo computacional excessivo.

### **Função Objectivo**

$$\min E = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{k \in F} C_{kj}(P_{kjt}) \cdot \Delta j, \quad j = 1, \dots, J; \quad t = 1, \dots, T \quad (4.1)$$

### **Restrições**

- Balanço de energia

$$\sum_{k \in F} P_{kjt} \geq D_{jt} - H_{jt} - OPRE_{jt} - INT_{jt} - EOL_{jt} \quad (4.2)$$

- Limites de potência das unidades térmicas, limites mínimos e máximos

$$P_{kjt}^- \leq P_{kjt} \leq P_{kjt}^+ \quad (4.3)$$

As centrais térmicas têm um limite mínimo de potência para qual aceitam funcionar, visto não ser rentável o seu funcionamento abaixo deste limite, tendo em conta todos os gastos inerentes. Assim, estabelece-se um patamar mínimo e obviamente também um patamar máximo de produção.

- Disponibilidade de potência nas centrais térmicas

$$P_{kjt}^+ = (1 - m_{kt}) \cdot i_{kt} \cdot (1 - f_{kt}) \cdot P_k \cdot a_{kj} \quad , \quad j = 1, \dots, J; \quad t = 1, \dots, T; \quad k \in F \quad (4.4)$$

Estas restrições traduzem a potência disponível para cada unidade de produção.

- Restrições impondo a realização de uma acção de manutenção por ano por cada unidade térmica de produção

$$\sum_{t=1}^T m_{kt} = S_k \quad , \quad k \in F \quad (4.5)$$

- Continuidade da acção de manutenção

$$\sum_{t=t_k}^{t_k+S_k-1} m_{kt} = S_k \quad , \quad k \in F \quad (4.6)$$

- Disponibilidade das equipas de manutenção

$$\sum_{k \in V_r} m_{kt} \leq V_{rt}^+ \quad , \quad j = 1, \dots, J; \quad r = 1, \dots, R \quad (4.7)$$

- Limitação dos períodos de manutenção

$$\begin{aligned} t_k^- &\leq t_k \leq t_k^+ \quad , \quad k \in F \\ (t_k^+ - t_k^- + 1) &\geq S_k - 1 \quad , \quad k \in F \end{aligned} \quad (4.8)$$

- Variável binária relativa às acções de manutenção

$$m_{kt} \in \{0, 1\}, \quad j = 1, \dots, J; k \in F \quad (4.9)$$

Este problema de programação matemática tem um carácter combinatório incluindo variáveis inteiras  $m_{kt}$  e  $t_k$ , bem como diversas variáveis contínuas.

Nesta formulação:

- $C_{kj}$  – custo de produção do grupo  $k$  no período  $j$ ;
- $P_{kjt}$  – potência despachada do grupo  $k$  no período  $j$ , na semana  $t$ ;
- $\Delta j$  – duração em horas do período  $j$ ;
- $D_{jt}$  – carga no período  $j$ , na semana  $t$ ;
- $H_{jt}$  – potência hídrica no período  $j$ , na semana  $t$ ;
- $OPRE_{jt}$  – potência de outras PRE no período  $j$ , na semana  $t$ ;
- $INT_{jt}$  – potência das interligações no período  $j$ , na semana  $t$ ;
- $EOL_{jt}$  – potência eólica no período  $j$ , na semana  $t$ ;
- $T$  – número total de semanas, 52;
- $F$  – número total de grupos;
- $P_{kjt}^+$  – potência máxima despachada do grupo  $k$  no período  $j$ , na semana  $t$ ;
- $P_{kjt}^-$  – potência mínima despachada do grupo  $k$  no período  $j$ , na semana  $t$ ;
- $m_{kt}$  – estado de manutenção do grupo  $k$  na semana  $t$ ;
- $i_{kt}$  – estado de operação do grupo  $k$  na semana  $t$ ;
- $f_{kt}$  – indisponibilidade forçada do grupo  $k$  na semana  $t$ ;
- $P_k$  – capacidade nominal do grupo  $k$ ;
- $a_{kj}$  – disponibilidade do grupo  $k$  no período  $j$ ;
- $S_k$  – duração em semanas da acção de manutenção;
- $t_k$  – semana de inicio da acção de manutenção referente ao grupo  $k$ ;
- $t_k^+$  – semana final do intervalo escolhido da acção de manutenção referente ao grupo  $k$ ;
- $t_k^-$  – semana inicial do intervalo escolhido da acção de manutenção referente ao grupo  $k$ ;
- $V_{rt}^+$  – número máximo de grupos em simultâneo que a equipa  $V_r$  está habilitada para ter em manutenção.

#### 4.4 Fluxograma do Problema

De seguida é apresentado o fluxograma do algoritmo de resolução deste problema utilizando *Simulated Annealing*:



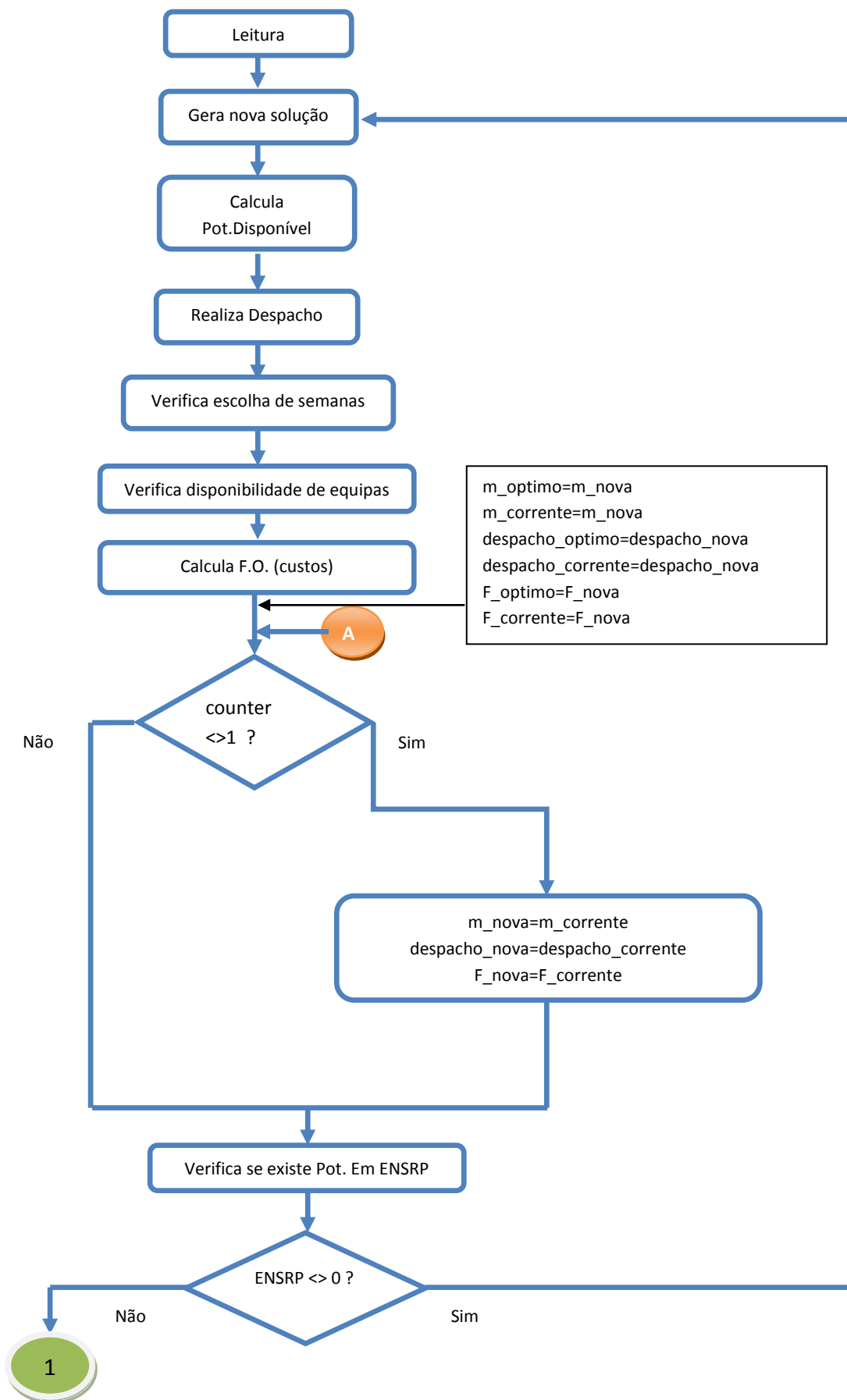


Figura 4.1 – Fluxograma de resolução do problema de calendarização das acções de manutenção.

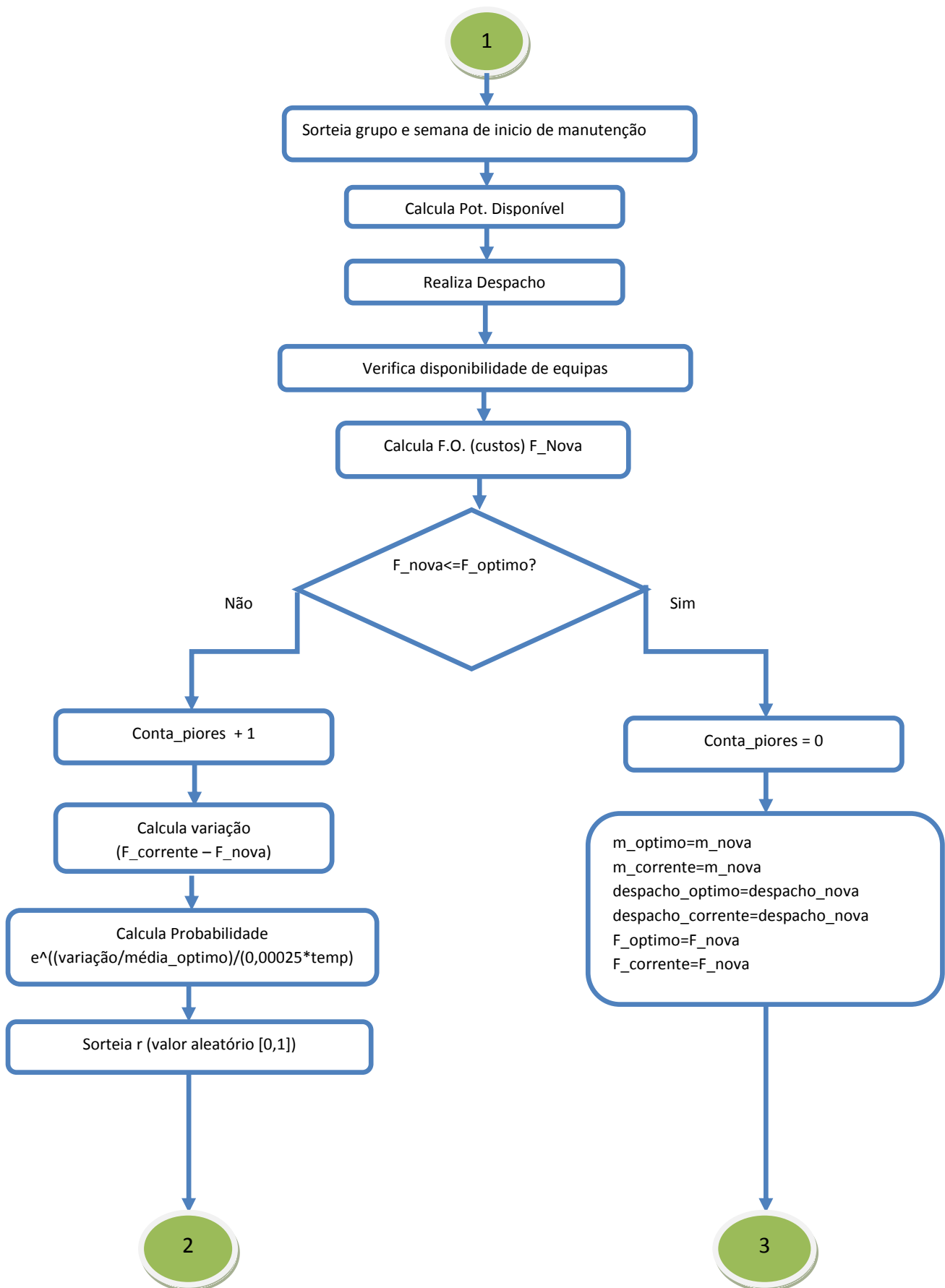


Figura 4.1 – Fluxograma de resolução do problema de calendarização das acções de manutenção (continuação).

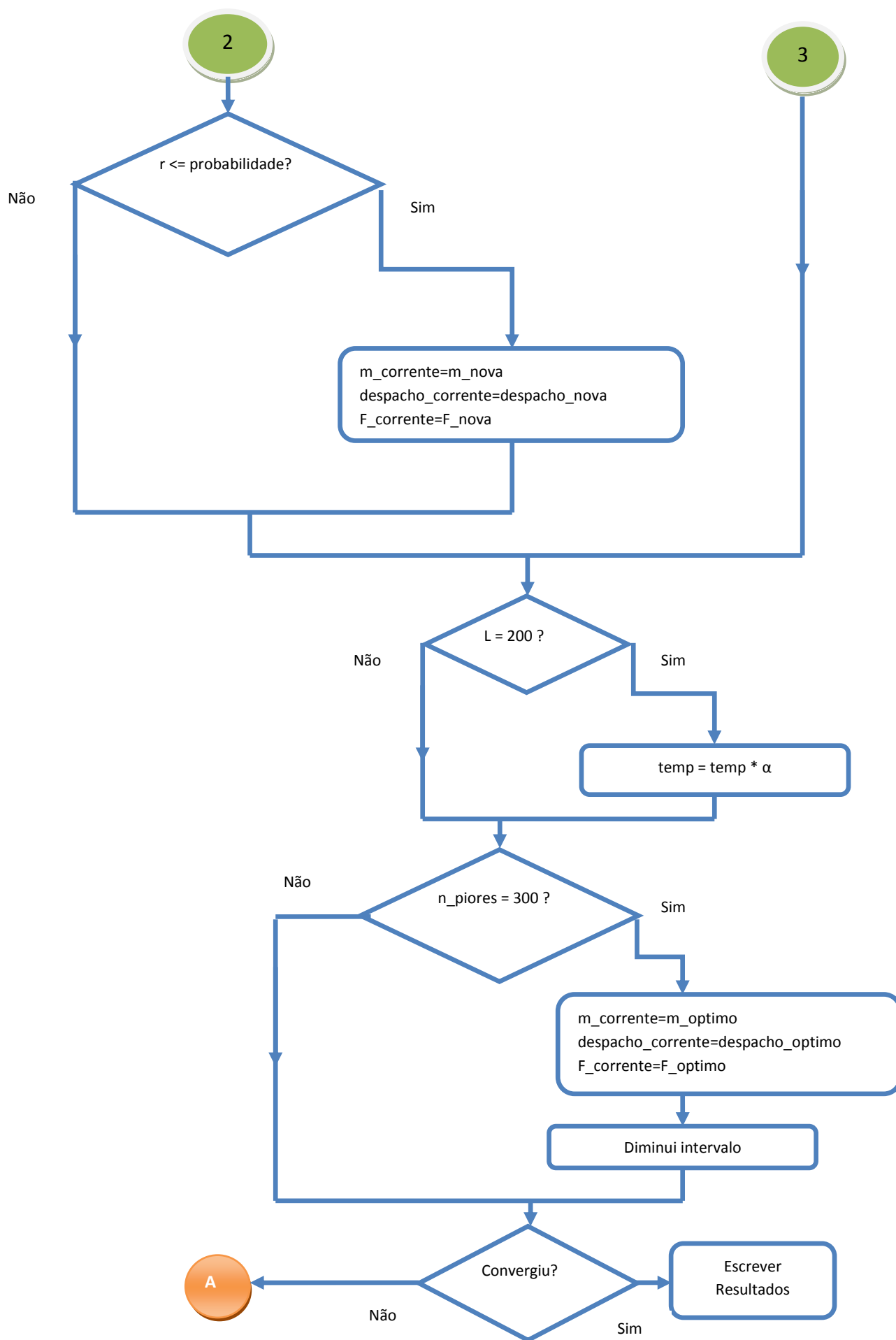


Figura 4.1 – Fluxograma de resolução do problema de calendarização das acções de manutenção (continuação).

Como ilustrado neste fluxograma, em cada iteração são realizados 5 despachos económicos para os grupos térmicos, um para cada período horário. Em cada despacho, os grupos são ordenados por ordem ascendente dos seus custos variáveis. O despacho é realizado de forma a preencher a totalidade de potência disponível nos grupos mais baratos até totalizar o valor da carga para o período em questão, tendo sempre em conta os grupos que estejam quer em manutenção, quer estejam fora de serviço por outras razões para além da manutenção. Desta forma, são apenas despachados os grupos que se encontram totalmente disponíveis para tal e atendendo sempre aos seus limites mínimos e máximos. Este último é afectado pelo factor  $f_{kt}$  que representa a indisponibilidade forçada do grupo  $k$  na semana  $t$ .

Como são tidos em conta os limites de potência dos grupos há a salientar que é necessário fazer acertos de potência, por exemplo acertar a potência com o gerador despachado  $k-1$  porque a quantidade despachada para o gerador  $k$  infringe o seu valor mínimo. Nestas condições, é adicionada potência ao gerador  $k$  para garantir um valor superior ao mínimo e, como consequência, é subtraída potência ao gerador  $k-1$ . Por vezes, tal acerto pode necessariamente ter de ser realizado em mais que um grupo, pois tal subtracção pode levar a infringir o valor mínimo de potência do gerador  $k-1$ . Então, este gerador terá de fazer acertos com os geradores anteriores.

Estes acertos devem ser realizados de forma a garantir o valor mínimo de produção de todos os geradores e tendo sempre em conta que estes acertos não poderão afectar geradores declarados indisponíveis por manutenção.

Finalmente, assinala-se que estes acertos permitirão obter o despacho final para cada nível de carga considerado, respeitando os valores mínimos e máximos dos geradores disponíveis e tendo em conta os seus custos de produção.

No capítulo 5 será ilustrada a utilização deste algoritmo e da respectiva aplicação computacional na resolução de um problema real, representativo do sistema electroprodutor nacional.

## Capítulo 5

### Caso de Estudo

#### 5.1 Dados do Problema

Para a resolução deste problema foram cedidos pela EDP Produção valores das características das centrais que entrariam no problema, desde de preços de produção de energia eléctrica (encargos variáveis - €/GWh), bem como outras características técnicas como a indisponibilidade forçada entre outras. O sistema produtor em análise é constituído por 11 centrais correspondendo a 30 grupos, para os quais é necessário realizar despachos para cada período horário das 52 semanas com o intuito de satisfazer totalmente a produção a assegurar por via térmica.

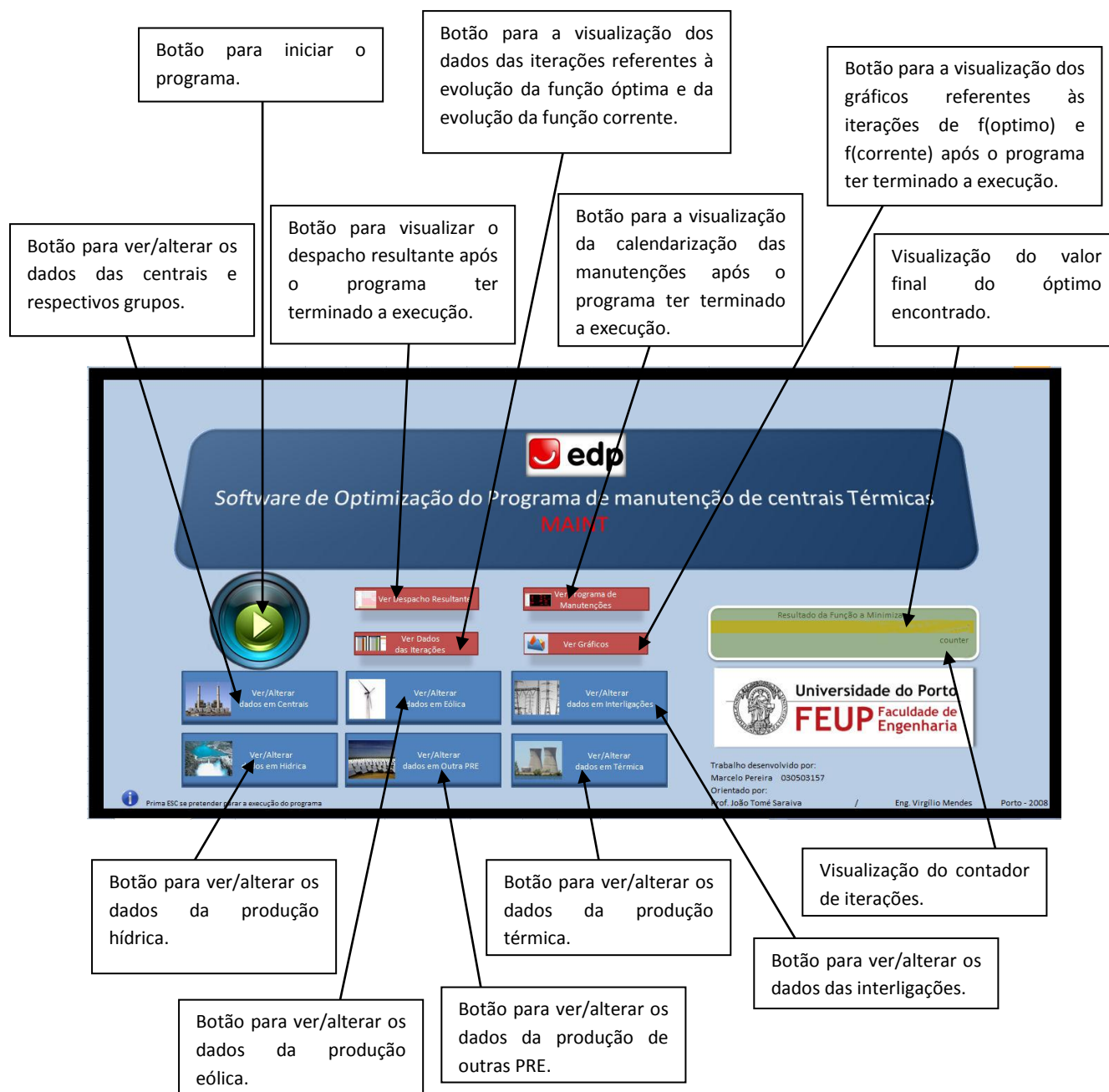
A Tabela A1 em anexo apresenta os valores relativos aos grupos, e depois na Tabela A2, na Tabela A3, na Tabela A4, na Tabela A5, e na Tabela A6 igualmente em anexo, encontram-se as características de todos os grupos relativas a cada período horário considerado. Assinala-se que os valores dos encargos variáveis já se encontram multiplicados pelo número de horas respectivo de cada período.

Neste problema existe a possibilidade de escolha de um período de semanas no qual se pretende que determinado grupo entre em manutenção, sendo esta informação disponibilizada na Tabela A7 em anexo.

Para que a resolução deste problema fosse possível também foram necessários os valores semanais da carga e produções de energia eléctrica nas diferentes vertentes. De salientar que a EDP Produção forneceu valores mensais, que foram convertidos em valores semanais, dividindo o valor mensal pelo número de dias desse mesmo mês e assim obtendo um valor médio diário. Em seguida, procedeu-se ao preenchimento das 52 semanas, tal como se ilustra na Tabela A8 em anexo.

Os valores referidos anteriormente relativos à carga, produções e fluxos nas interligações são ilustradas em tabelas nos anexos, mais concretamente, Carga – Tabela A9, Produção Hídrica – Tabela A10, Produção Eólica – Tabela A11, Produção Outras PRE – Tabela A12, Interligações – Tabela A13 e Produção Térmica – Tabela A14.

Para uma melhor compreensão da aplicação desenvolvida, nas figuras seguintes é ilustrado o ambiente de trabalho do programa MAINT.



**Figura 5.1 – Ambiente de trabalho do programa MAINT, janela de apresentação.**

A Figura 5.1 ilustra o ambiente de trabalho principal do programa MAINT, ou seja, a janela de apresentação, no qual cada botão tem uma acção específica, abrindo novas janelas que serão de seguida apresentadas em diferentes figuras.

A Figura 5.2 ilustra a janela referente às centrais, onde se pode visualizar todos os dados referentes aos grupos relativamente a todos os postos horários.

**Figura 5.2 – Janela referente às centrais.**

Deve notar-se que todas as janelas contêm um botão para permitir regressar à janela de apresentação, ou seja, ao ambiente de trabalho ilustrado na Figura 5.1.

As figuras seguintes ilustram as diferentes janelas respeitantes aos diferentes tipos de produção de energia eléctrica, nomeadamente, produção hídrica – Figura 5.3, produção eólica – Figura 5.4, outras PRE – Figura 5.5, produção térmica – Figura 5.6 bem como em relação às interligações – Figura 5.7.

**Figura 5.3 – Janela referente à produção hídrica.**

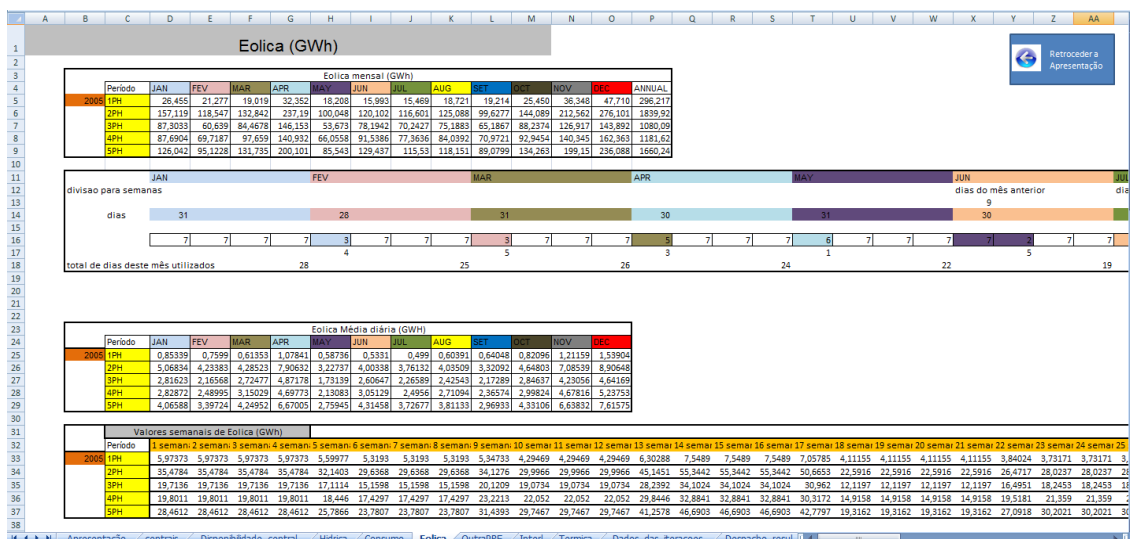


Figura 5.4 – Janela referente à produção eólica.

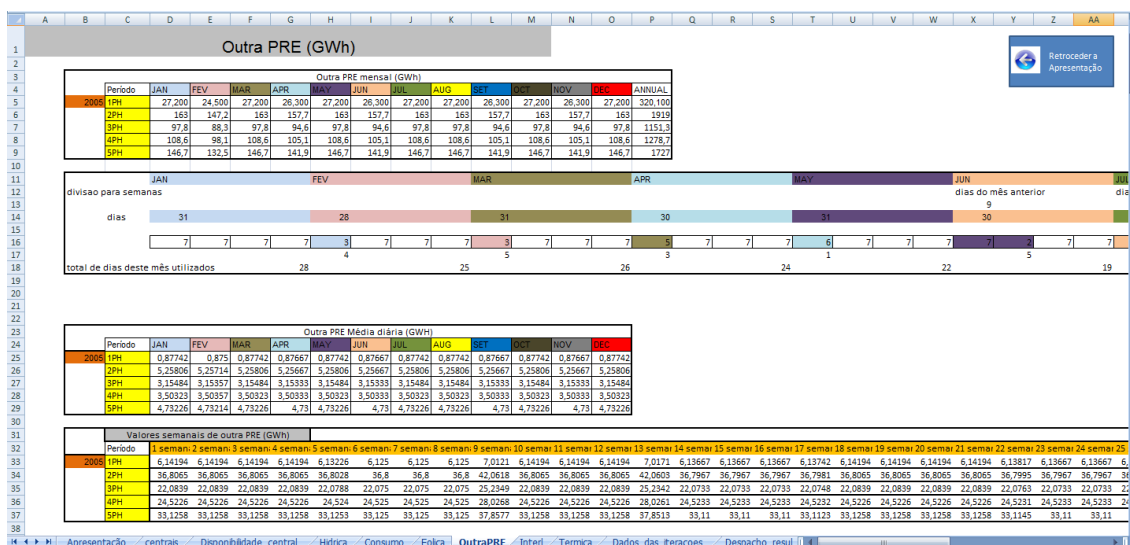


Figura 5.5 – Janela referente à produção em outras PRE.



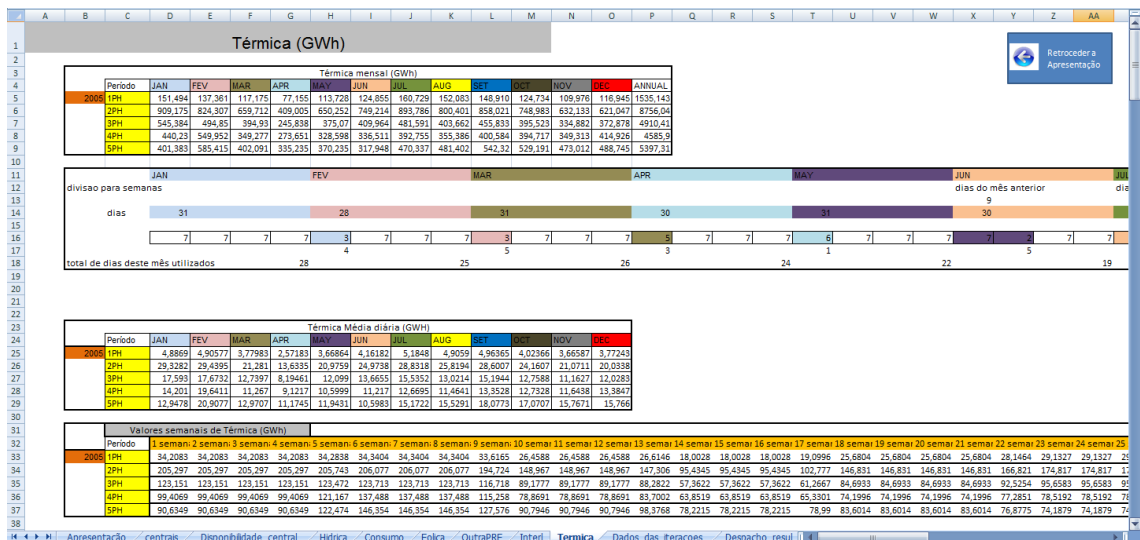


Figura 5.6 – Janela referente à produção térmica.

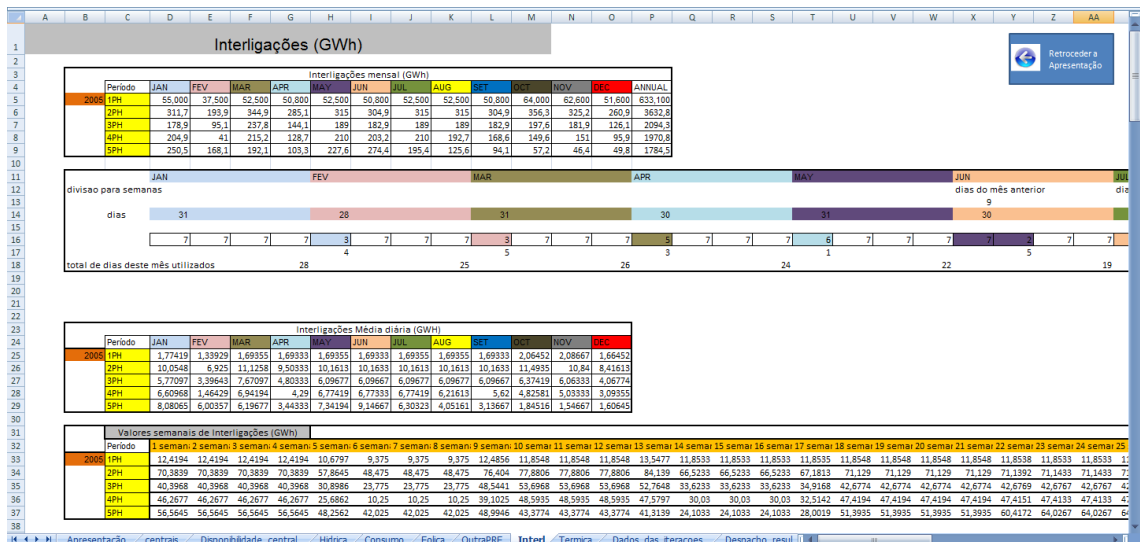
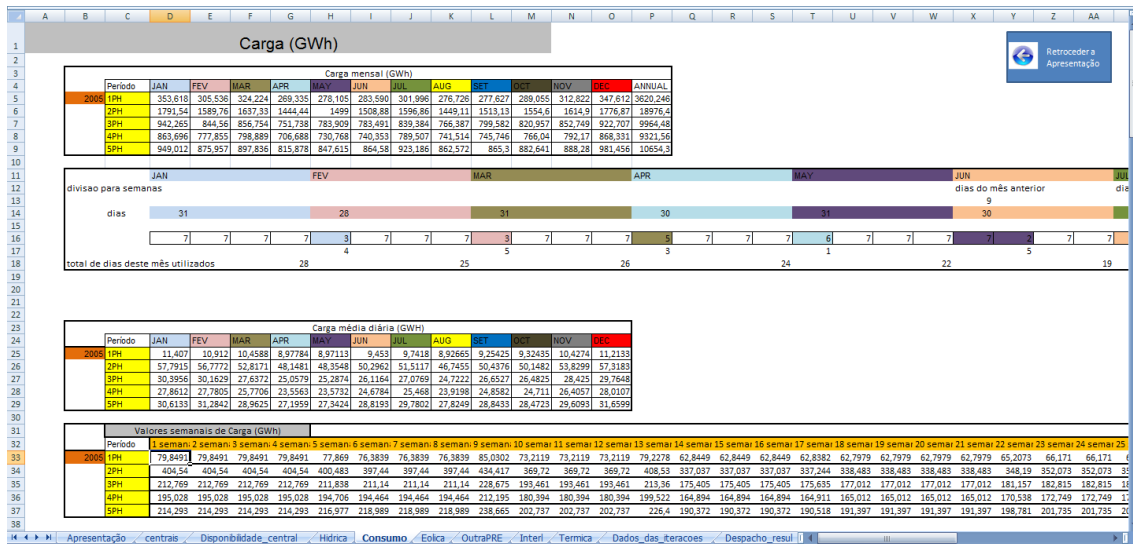
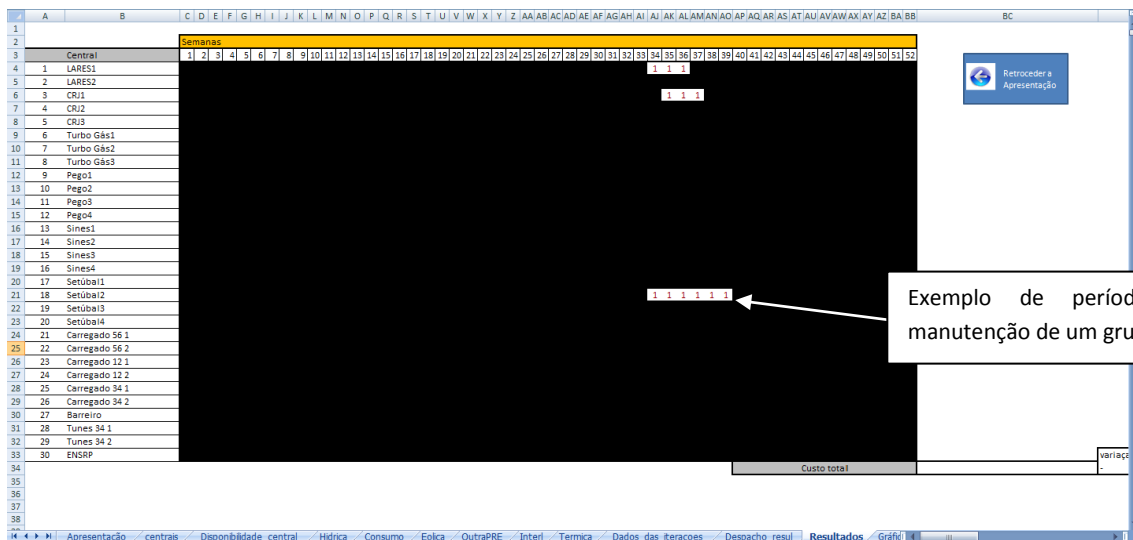


Figura 5.7 – Janela referente à potência que flui nas linhas de interligações.

Para terminar, de seguida é apresentada a janela referente à carga a satisfazer, Figura 5.8, e as janelas referentes à saída de resultados, nomeadamente a janela respectiva à calendarização das manutenções – Figura 5.9, a janela referente aos despachos de todos os grupos nos 5 períodos horários considerados – Figura 5.10, a janela que inclui os valores de todas as iterações das diferentes funções – Figura 5.11 e a janela contendo os gráficos das diferentes funções ao longo das iterações – Figura 5.12.



**Figura 5.8 – Janela referente à potência de carga.**



**Figura 5.9 – Janela contendo a calendarização das manutenções.**

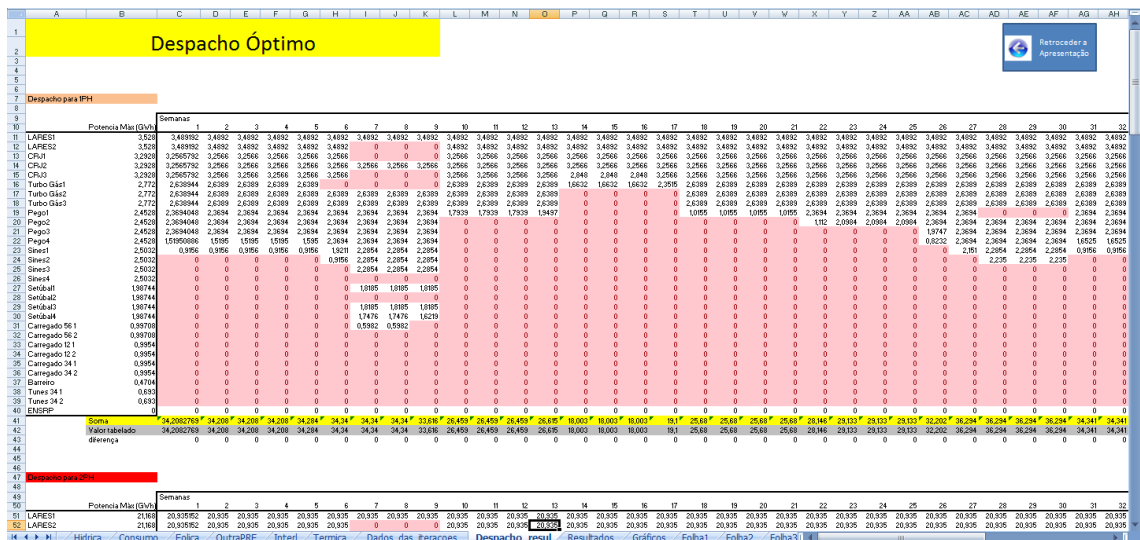


Figura 5.10 – Janela contendo os resultados do despacho económico para cada um dos 5 períodos considerados.

Refira-se que as tabelas apresentadas na Figura 5.10 estão formatadas de modo a informar o utilizador acerca de algum grupo que infrinja o seu máximo ou mínimo técnico em qualquer período. Nestes casos, as células respectivas são colocadas a vermelho.

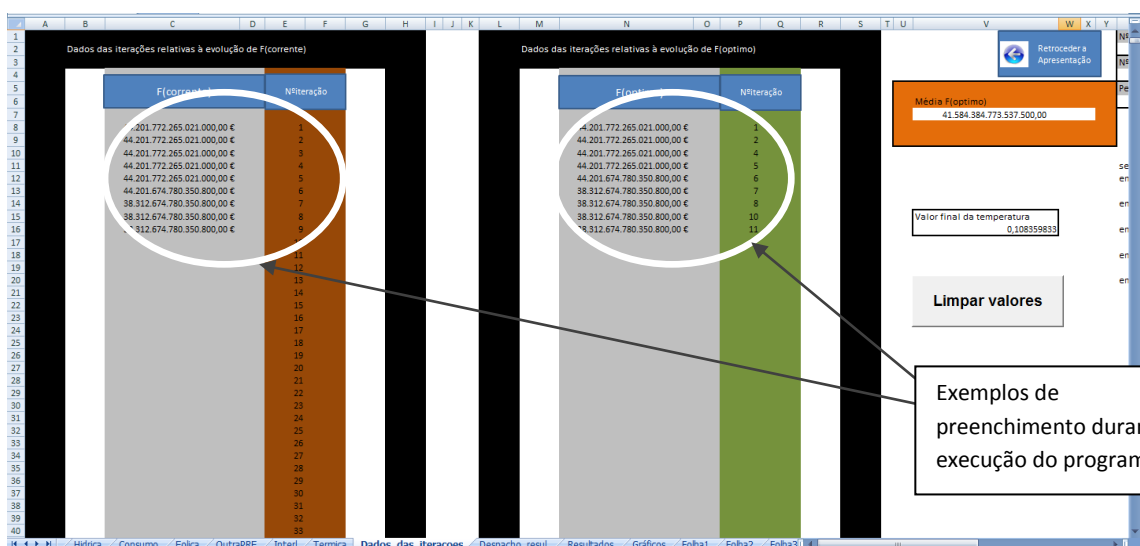


Figura 5.11 – Janela referente aos resultados das iterações.

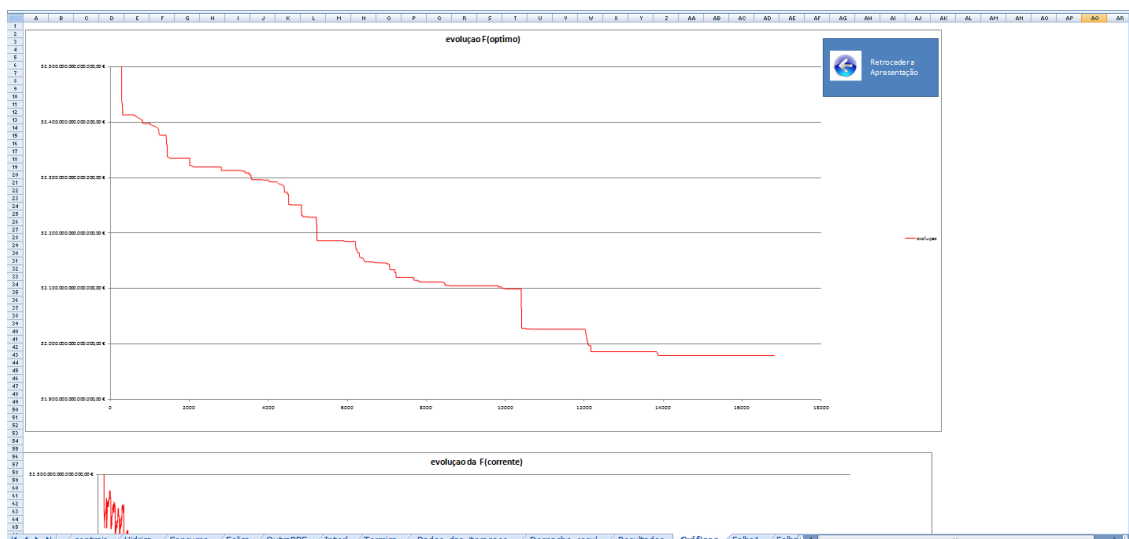


Figura 5.12 – Janela referente à evolução da função de avaliação.

Nesta última janela podem-se visualizar os gráficos relativos à evolução da função  $F(\text{óptimo})$  referente aos melhores valores encontrados durante o processo iterativo e também a evolução da função  $F(\text{corrente})$  que se refere ao valor das soluções correntes ao longo do processo. Finalmente, existe ainda um gráfico onde ambas as funções são sobrepostas para permitir uma melhor percepção da evolução do algoritmo do *Simulated Annealing*.

## 5.2 Técnica usada

A dificuldade de resolução de problemas reais possuindo carácter combinatório conduz a que, na prática, se recorra frequentemente a meta-heurísticas, implementações suficientemente flexíveis em termos da sua capacidade de modelizar restrições particulares muitas vezes bastante complexas.

O *Simulated Annealing* foi a meta-heurística escolhida para a resolução do problema em análise. A escolha foi orientada na tentativa de conciliar a obtenção de resultados credíveis, e simultaneamente, garantir uma flexibilidade de adaptação do algoritmo a novas solicitações. Em linhas gerais, esta técnica baseia-se na pesquisa aleatória tendendo para o óptimo de forma assintótica.

Este método permite que o processo iterativo evolua para soluções de melhor qualidade, aceitando por vezes ao longo deste processo, com uma probabilidade calculada, soluções com piores valores da função de avaliação. Pretende-se assim

evitar óptimos locais e, em simultâneo, reduzir largamente o tempo computacional para obter uma boa solução comparativamente com uma técnica de enumeração. Relativamente a este problema em concreto com 30 grupos e 52 semanas possíveis para realizar a manutenção, o número de combinações possíveis é de  $3,0206E+51$ , pelo que se revela impraticável realizar a sua resolução por enumeração. Utilizando a metaheurística *Simulated Annealing* apenas foi necessário analisar cerca de  $8E-48$  % do número total de combinações já referido para convergir e, desta forma, encontrar uma boa solução.

Se se pretendesse analisar todas as possíveis combinações e se admitisse que cada uma delas demorasse 0,01 segundos a ser analisada, o tempo de cálculo seria superior a  $9E+41$  anos. Para obter este número, considerou-se que em cada combinação são realizados despachos referentes a 5 níveis de carga. Tal revela-se impraticável pelo que se recorreu ao *Simulated Annealing* para obter soluções de boa qualidade de forma rápida e eficaz, tendo como tempo computacional cerca de 15-20 minutos, dependendo da solução de partida do algoritmo.

Para reduzir o tempo de cálculo computacional algumas das restrições, nomeadamente as restrições relativas ao limites máximos e mínimos de potência das unidades térmicas (restrição 4.3), à imposição de uma acção de manutenção por ano (restrição 4.5), à continuidade da acção de manutenção (restrição 4.6) e à limitação dos períodos de manutenção (restrição 4.8), foram consideradas a nível de programação, ou seja, não foram introduzidas considerando penalizações na função de avaliação para que o algoritmo se possa encaminhar para o tipo de soluções pretendidas, uma vez que seria demorado e poderia até comprometer a convergência do mesmo.

### 5.3 Resultados

De seguida, apresentam-se alguns resultados obtidos com esta aplicação para o sistema produtor referido. Os valores apresentados serão escolhidos de forma a evidenciar os aspectos mais relevantes dos estudos realizados.

Neste problema foi considerado o sistema electroprodutor nacional, pelo que se pretende resolver um problema real. O sistema é constituído por 11 centrais correspondendo a 30 grupos, para os quais é necessário realizar a respectiva calendarização das manutenções.

## 1º Exemplo

Inicialmente, foi realizado um estudo considerando que todas as centrais estavam disponíveis em todas as semanas, ou seja,  $i_{kt} = 1$ . Nestas condições, cada grupo pode ficar em manutenção em qualquer semana dentro das 52 semanas, tal como se demonstra na Tabela 5.1. Outras características deste exemplo incluem a disponibilidade total de todos os grupos em todos períodos horários, ou seja,  $a_{kj} = 1$  não havendo preferência de semanas de manutenção de qualquer grupo.

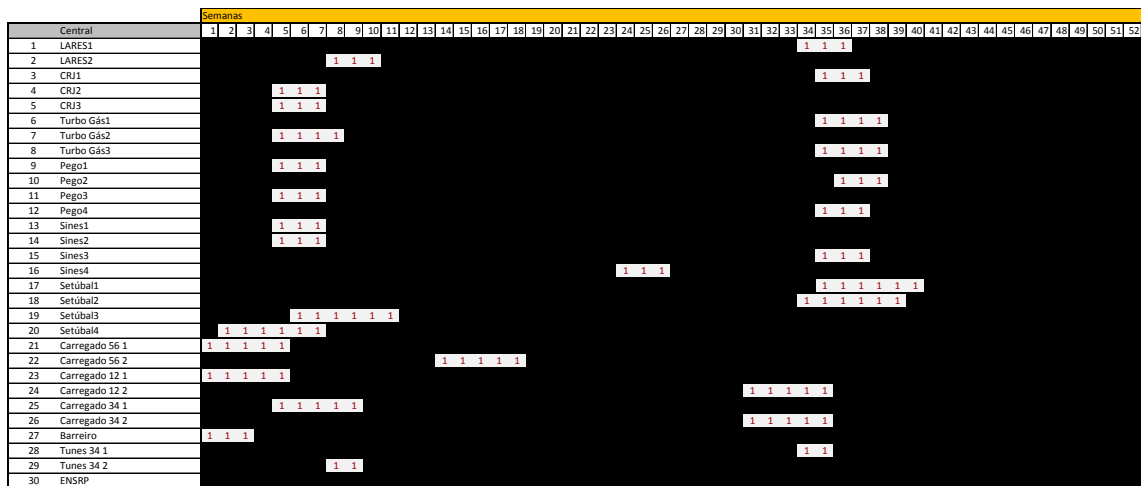
[illegible]

**Tabela 5.1 – Disponibilidade dos grupos referente ao 1º exemplo.**

Depois de iniciar o programa após alguns minutos este terminou a sua execução tendo convergido ao fim de 22261 iterações. De seguida são ilustrados os respectivos resultados.

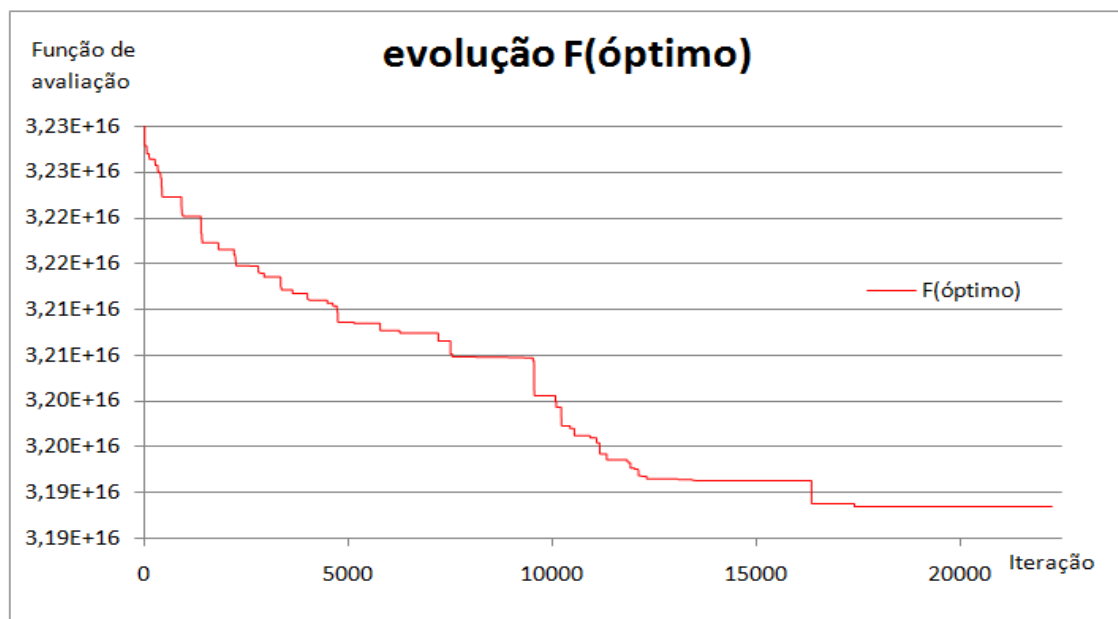
Os resultados dos despachos encontram-se em anexo ilustrados em tabelas, mais propriamente na Tabela A15 – despacho para o 1º período, Tabela A16 - despacho para o 2º período, Tabela A17 - despacho para o 3º período, Tabela A18 - despacho para o 4º período, Tabela A19 - despacho para o 5º período. Ao realizar uma análise atenta dos valores destas tabelas nota-se que nenhum valor se encontra fora dos limites técnicos e que o despacho foi realizado por ordem crescente dos custos variáveis. Nestas tabelas também se podem visualizar alguns dos grupos que se encontram em manutenção, mais propriamente os mais baratos, pois estes encontram-se nas primeiras posições e nas semanas de manutenção os valores de despacho referentes a estes grupos encontram-se a zero.

Para uma melhor compreensão do despacho apresenta-se uma análise à calendarização do programa de manutenções, que se encontra ilustrado na Figura 5.13.



De acordo com esta figura, nota-se a existência de muitos grupos em manutenção no período da semana 4 à semana 9. Esta situação deve-se ao facto de estas semanas estarem inseridas num período onde existe mais produção hídrica libertando assim centrais térmicas para manutenção. Por outro lado o período da semana 34 à semana 39 é o período de menor consumo de energia eléctrica pelo que existe a possibilidade de alguns grupos realizarem a sua acção de manutenção.

Para verificar a evolução do processo de convergência do algoritmo, de seguida são apresentados gráficos representando a evolução das 2 funções do algoritmo,  $F(\text{óptimo})$  representando a evolução das melhores soluções encontradas ao longo da execução do programa e  $F(\text{corrente})$  representado a evolução do valor da solução corrente. No Gráfico 5.1 é apresentado a evolução da função  $F(\text{óptimo})$ .



**Gráfico 5.1 – Evolução de  $F(\text{óptimo})$  referente ao 1º exemplo.**

A partir da análise do Gráfico 5.1 verifica-se nas primeiras 13000 iterações uma rápida descida da função de avaliação tendo em atenção que o algoritmo teve como solução de partida  $3,81852\text{E}+16$  € convergindo na iteração número 22261 para uma solução com o valor da função de avaliação de  $3,18847\text{E}+16$  €, ou seja, obtendo-se uma melhoria de  $6,30054\text{E}+15$  €.

Para uma melhor percepção do funcionamento do *Simulated Annealing* seguidamente é apresentado no Gráfico 5.2 a evolução de F(corrente).

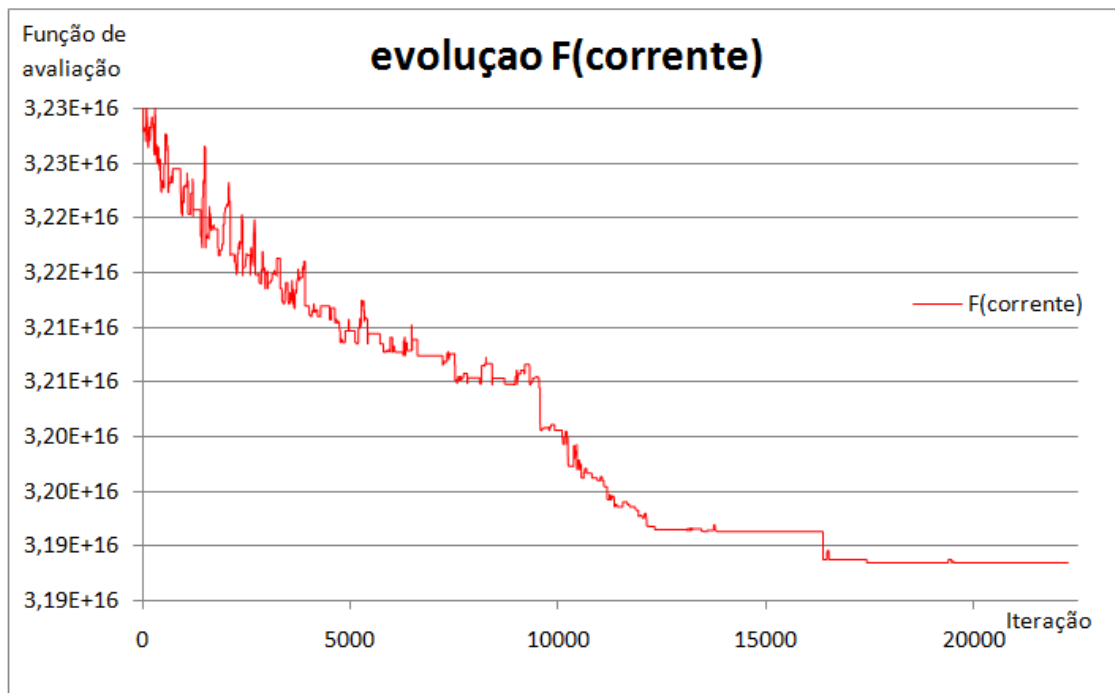


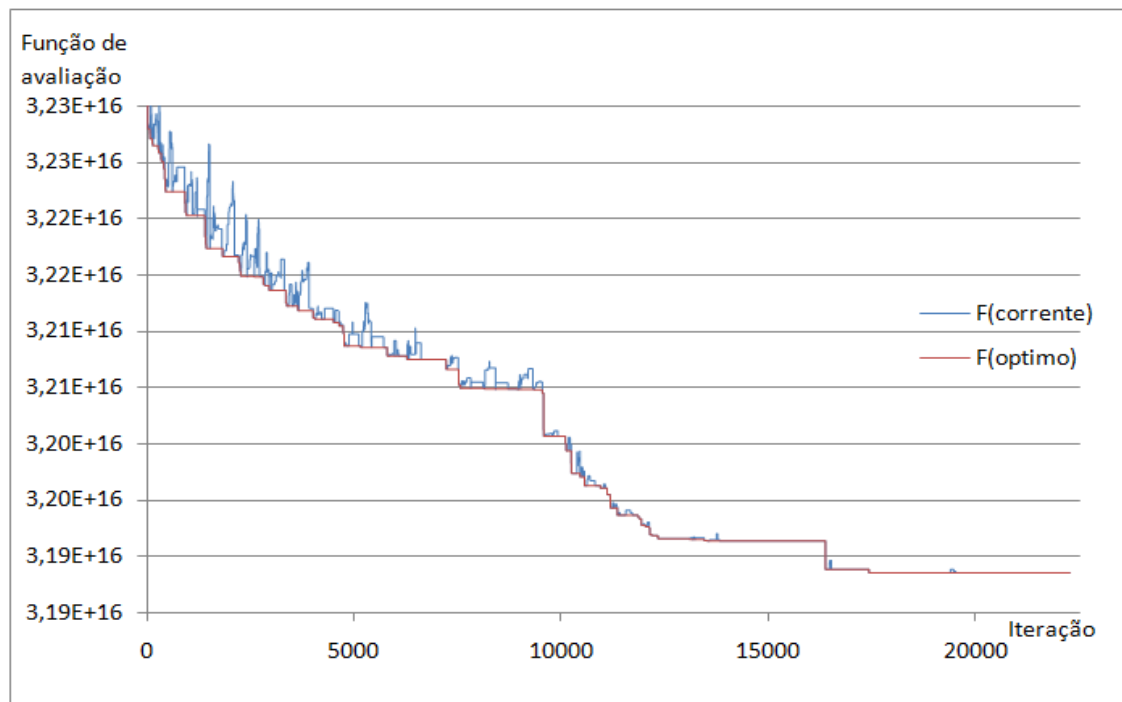
Gráfico 5.2 – Evolução de F(corrente) referente ao 1º exemplo.

Através da análise do Gráfico 5.2 verifica-se que inicialmente o algoritmo permite uma maior aceitação de piores soluções e que, ao longo do processo iterativo, essa aceitação vai diminuindo. Como se referiu no Capítulo 3, a probabilidade de aceitação de piores soluções é mais elevada inicialmente dificultando-se progressivamente a aceitação de soluções piores. Como se pode verificar, nas últimas 7000 iterações não ocorrem praticamente situações deste género.

Verifica-se que nas primeiras 10000 iterações o algoritmo possui uma temperatura considerável. Este parâmetro está directamente associado à probabilidade de aceitação de soluções piores, pelo que são aceites mais soluções piores comparativamente com o que ocorre na parte final do processo iterativo.

Para uma melhor análise desta evolução, o Gráfico 5.3 apresenta a sobreposição dos dois gráficos anteriormente referidos.





## 2º Exemplo

Neste exemplo considerou-se que alguns grupos se encontram indisponíveis em algumas semanas, ou seja, em algumas semanas  $i_{kt} = 0$ , tal como se pode verificar na Tabela 5.2. Outra característica deste exemplo refere-se à disponibilidade total de todos os grupos em todos períodos horários, ou seja,  $a_{kj} = 1$  sendo ainda de salientar que neste exemplo foram fixados intervalos de semanas de manutenção de alguns grupos, tal como indica a Tabela 5.3.

[illegible]

nºgrupo	Id. Central	primeira semana de manutenção possível	última semana de manutenção possível
1	LARES1	1	52
2	LARES2	1	52
3	CRJ1	1	20
4	CRJ2	1	52
5	CRJ3	1	52
6	Turbo Gás1	1	52
7	Turbo Gás2	1	52
8	Turbo Gás3	1	30
9	Pego1	1	52
10	Pego2	1	52
11	Pego3	1	52
12	Pego4	1	52
13	Sines1	1	52
14	Sines2	1	52
15	Sines3	1	52
16	Sines4	1	52
17	Setúbal1	30	50
18	Setúbal2	1	52
19	Setúbal3	1	52
20	Setúbal4	1	52
21	Carregado 56 1	1	52
22	Carregado 56 2	1	52
23	Carregado 12 1	20	40
24	Carregado 12 2	1	52
25	Carregado 34 1	1	52
26	Carregado 34 2	1	52
27	Barreiro	1	52
28	Tunes 34 1	1	52
29	Tunes 34 2	1	52
30	ENSRP	1	52

Tabela 5.3 – Intervalo de semanas para manutenção dos grupos referente ao 2º exemplo.

Depois de iniciar o programa após alguns minutos este terminou a sua execução tendo convergido ao fim de 22524 iterações. De seguida são ilustrados os respectivos resultados.

Os resultados dos despachos encontram-se em anexo ilustrados em tabelas, mais propriamente na Tabela A20 – despacho para o 1º período, Tabela A21 - despacho para o 2º período, Tabela A22 - despacho para o 3º período, Tabela A23 - despacho para o 4º período, Tabela A24 - despacho para o 5º período. Ao analisar estes valores conclui-se que nenhum valor se encontra fora dos limites técnicos e que o despacho foi realizado por ordem crescente dos custos variáveis. Nestas tabelas também se podem visualizar alguns dos grupos que se encontram em manutenção, mais propriamente os mais baratos, pois estes encontram-se nas primeiras posições e nas semanas de manutenção os seus valores de despacho encontram-se a zero. De salientar que nos despachos se visualiza também as semanas em que  $i_{kt} = 0$ . Nestas semanas os respectivos grupos (ver Tabela 5.2) têm os despachos igualados a zero.

Atendendo a estes elementos, o resultado obtido para a calendarização das manutenções é apresentada da Figura 5.14, onde se nota uma acentuação de manutenções no período da semana 37 à 39, devido a neste período haver menor consumo de energia eléctrica e, por isso, se libertarem centrais térmicas para manutenção. Outras encontram-se em manutenção entre a semana 6 à semana 9 visto

haver uma maior produção hídrica pelo que é igualmente possível libertar centrais térmicas para respectiva manutenção.

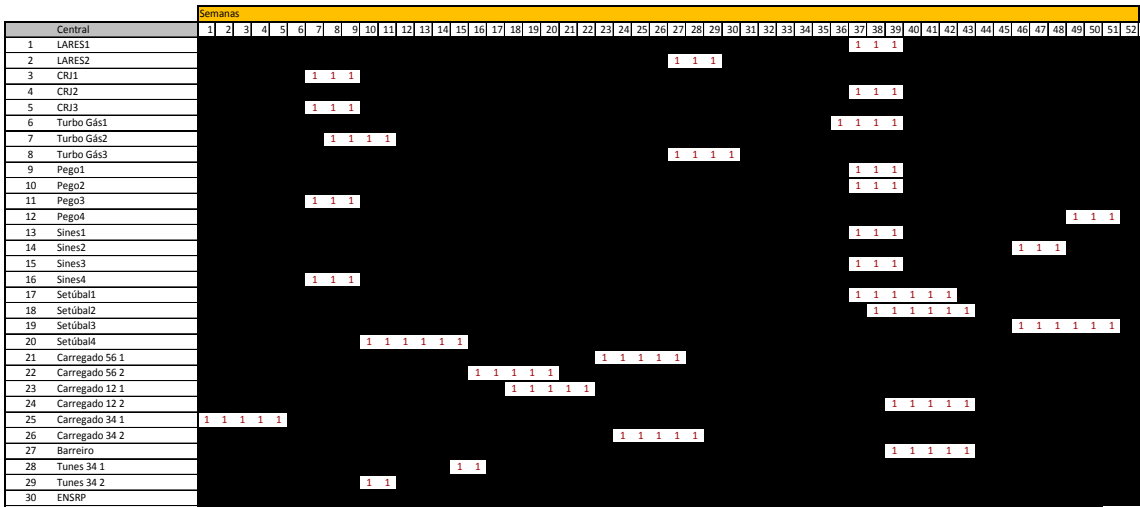


Figura 5.14 – Calendarização do programa de manutenção dos grupos referente ao 2º exemplo.

Através da análise da Tabela 5.3 que representa o intervalo de semanas para as quais os grupos podem realizar manutenção, verifica-se a partir da Figura 5.14 que tais restrições são cumpridas, visto que estes grupos têm as suas semanas de manutenção nos períodos a eles destinados.

Para verificar a evolução do processo de convergência do algoritmo, de seguida são apresentados dois gráficos, o Gráfico 5.4 representando a evolução de F(óptimo) e o Gráfico 5.5 representando a evolução de F(corrente).

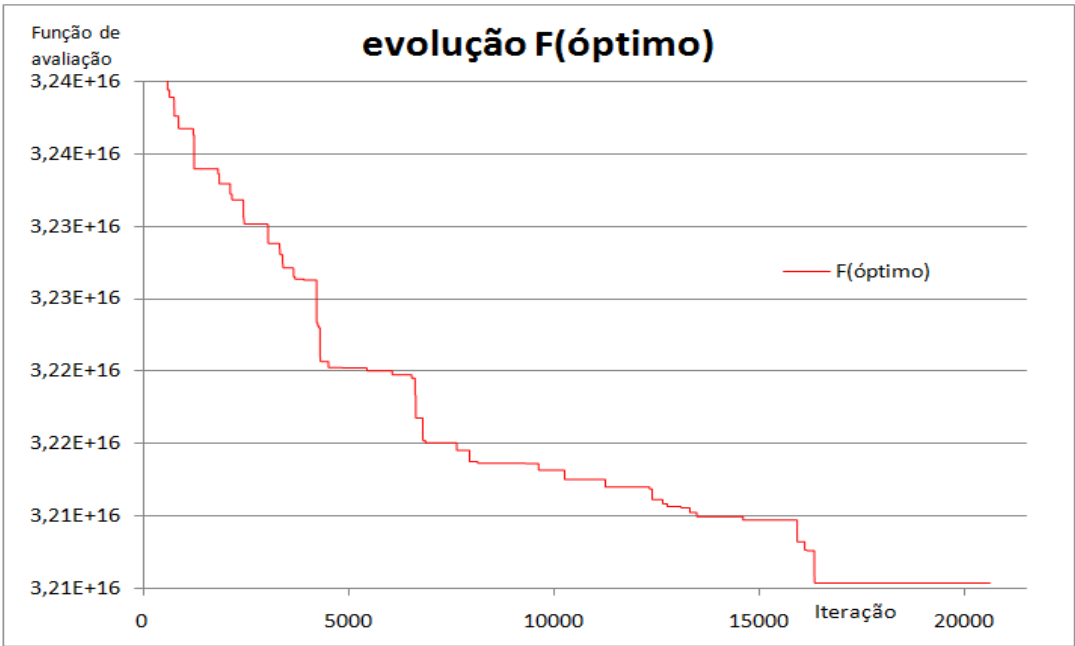


Gráfico 5.4 – Evolução de F(óptimo) referente ao 2º exemplo.

A partir da análise deste gráfico verifica-se que o algoritmo converge rapidamente, tendo em atenção que o algoritmo teve como solução de partida  $10,3016\text{E}+16\text{€}$  convergindo na iteração número 22524 para a solução óptima em que a função de avaliação tem o valor de  $3,2053\text{E}+16\text{€}$ , ou seja, obtendo-se uma melhoria de  $7,09626\text{E}+16\text{€}$ .

Para uma melhor percepção do funcionamento do *Simulated Annealing* seguidamente é apresentado no Gráfico 5.5 a evolução de  $F(\text{corrente})$ .

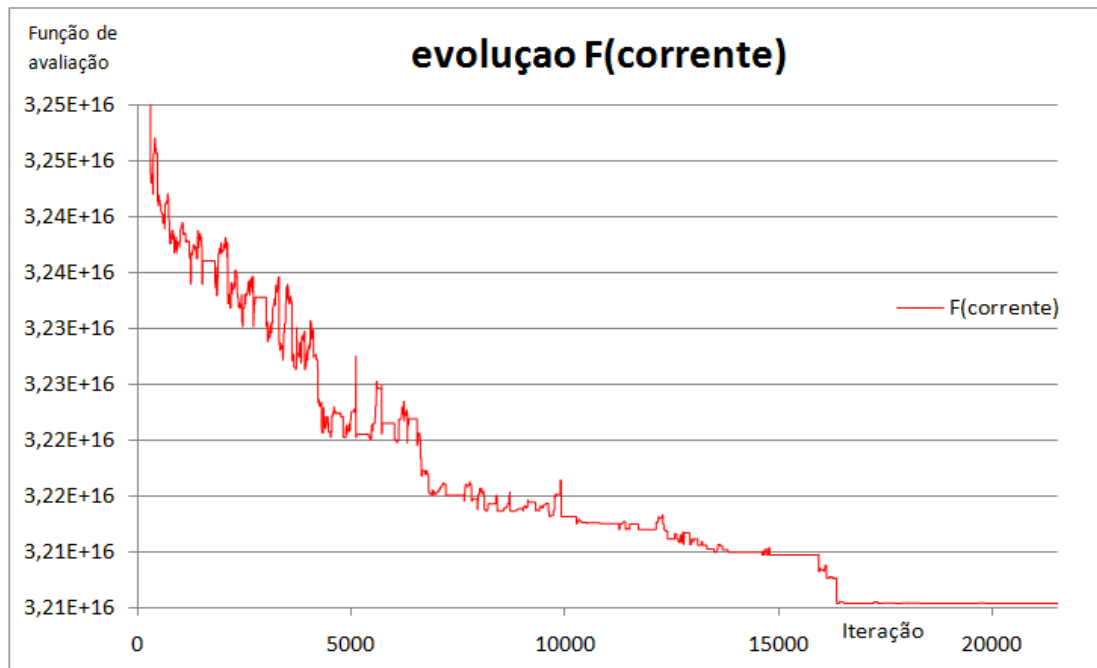


Gráfico 5.5 – Evolução de  $F(\text{corrente})$  referente ao 2º exemplo.

Através da análise do Gráfico 5.5 verifica-se que inicialmente o algoritmo permite uma maior aceitação de piores soluções e que, ao longo do processo iterativo, essa aceitação vai diminuindo. Tal pode ser verificado a partir da iteração número 10000 onde as variações da função são menores. Salienta-se que esta execução terminou com a temperatura no valor de 0,11.

Para uma melhor análise desta evolução, o Gráfico 5.6 apresenta a sobreposição dos dois gráficos anteriormente referidos.

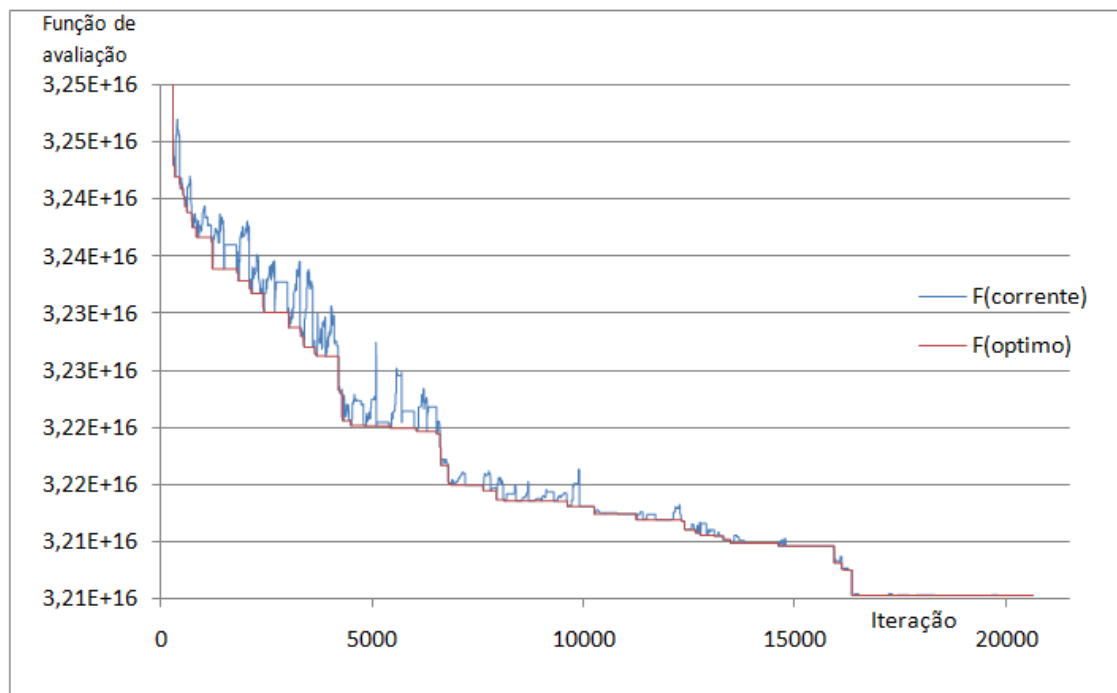


Gráfico 5.6 – Evolução de F(óptimo) e F(corrente) referente ao 2º exemplo.



## Capítulo 6

### Conclusões

O desenvolvimento dos mercados de electricidade impõe um cuidado acrescido na exploração dos parques produtores de forma a maximizar os proveitos a obter. Neste âmbito, a correcta calendarização das acções de manutenção das centrais contribuirá para atingir este objectivo.

Com efeito a qualquer sistema produtor está associado um custo de produção, que se procura minimizar mas qualquer sistema produtor está sujeito a avarias de modo aleatório no tempo, que influenciam desfavoravelmente a qualidade e o custo dos serviços por ele prestados.

Este projecto surgiu então neste âmbito, pois há necessidade de proceder a acções de manutenção preventivas nas unidades de produção de energia eléctrica para reduzir a frequência de avarias fortuitas. Nestas condições, há necessidade de obter uma calendarização optimizada das acções de manutenção. Num sistema de energia esta questão tornou-se uma importante tarefa tanto do ponto de vista da fiabilidade do sistema como do ponto de vista económico.

Ao longo do processo de elaboração deste trabalho foi possível verificar que ele era importante e fundamental num sistema de energia, tal foi muitas das vezes sublinhado em reuniões que decorreram na EDP Produção. No ambiente de trabalho desta empresa foi possível verificar a enorme importância deste algoritmo, denominado de MAINT, para interagir com o modelo VALORAGUA, dadas as dificuldades que vinham sendo evidenciadas pelas aplicações até então utilizadas.

A utilização da metaheurística *Simulated Annealing* mostrou-se muito eficaz na resolução deste problema combinatório, pois a escolha foi orientada na tentativa de conciliar a obtenção de resultados credíveis e simultaneamente garantir uma flexibilidade de adaptação do algoritmo a novas solicitações. Com este algoritmo conseguiram-se de forma rápida e eficaz boas soluções obtendo assim resposta para todas as exigências. As calendarizações obtidas respeitam todas as restrições impostas e todos os despachos económicos são viáveis a nível de cumprimento de todos os limites técnicos dos grupos bem como no que se refere a total satisfação da carga. De salientar a boa escolha desta metaheurística, pois tem como característica uma rápida convergência para boas soluções.

Desta forma, foram alcançados os objectivos inicialmente colocados e a EDP Produção conta agora com um novo algoritmo que lhe poderá ser muito útil em conjugação com o modelo VALORAGUA para otimizar a exploração do parque produtor.



## Bibliografia

- [1] W. K. Foong. Tese "Ant colony for optimization for power plant maintenance scheduling", 2007 . disponível em:  
<http://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/handle/2440/47786>
- [2] A. Abdulwhab, R. Billinton, A. A. Eldamaty, S. O. Faried, "Electric Power Components and Systems Maintenance Scheduling Optimization Using a Genetic Algorithm (GA) with a Probabilistic Fitness Function", Power Systems Research Group, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2004, disponível em:  
<http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t713399721>
- [3] F. Glover, "Tabu Search: fundamental and uses". Rapport Technique, Graduate School of Business, University of Colorado, Boulder, 1996.
- [4] M. Prais, & C.C. Ribeiro, "Parameter variation in GRASP implementations; in Proc. of the Third Metaheuristics International Conference, Brasil, 1999.
- [5] T.A. Feo, M. G. C. Resende, "Greedy Randomized Adaptive Search Procedures". (Kluwer Academic Publishers, Boston), Journal of Global Optimization, 1995.
- [6] M. Tomassini, " A Survey of Genetic Algorithm", II Anal Reviews of Computational Physics, World Scientific, 1998.
- [7] P. Hansen, e N. Mladenovic, "An Introduction to Variable Neighborhood Search", Les Cahiers du Gerad, 1997.
- [8] M. Dorigo & T. Stützle, "Ant Colony Optimization", MIT Press, 2004.
- [9] E. Aarts e J. Korst, " Simulated Annealing and Boltzmann Machine", John Wiley, 1989.
- [10] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing", Science, vol. 220, no. 4598, pp. 671-680, 1983.
- [11] N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, E. Teller. "Equations of State Calculations by Fast Computing Machines", Journal of Chemical Physics, 1953.
- [12] J. Pereira, J. Tomé Saraiva, M. T. Ponce de Leão, "Identification of Operation Strategies of Distribution Networks Using a Simulated Annealing Approach", Proceedings of the Budapest Power Tech, BPT'99, Budapest, Setembro de 1999.

[13] A. Seca Teixeira, “Modelo de programação de manutenção preventiva de grupos térmicos integrados num sistema electroprodutor hídrico-térmico”, Relatório Interno EDP, 1984.

## **Anexos**



Tabela A1 – Características das centrais intervenientes no problema

nºgrupo	Id. Central	Tecnologia	Pot. Liq. Unitária (GW)	Pot. Liq. Mínima (GW)	Enc. Var. €/GWh	Semanas Manutenção por grupo	Número equipas de manutenção	Indisp. Fort.	Enc. Var. €/MWh	Postos Horários	Nº de horas semanais	Primeira semana de manutenção	Última semana de manutenção
1	LARES1	CCGTPT	0,4200	0,2100	2816,16	3	1	1,10%	54,16	1PH - 5%	8,4	1	52
2	LARES2	CCGTPT	0,4200	0,2100	2816,16	3	1	1,10%	54,16	2PH - 30%	50,4	1	52
3	CRJ1	CCGTPT	0,3920	0,2352	2868,66	3	2	1,10%	55,17	3PH - 18%	30,24	1	52
4	CRJ2	CCGTPT	0,3920	0,2352	2868,66	3	2	1,10%	55,17	4PH - 20%	33,6	1	52
5	CRJ3	CCGTPT	0,3920	0,2352	2868,66	3	2	1,10%	55,17	5PH - 27%	45,36	1	52
6	Turbo Gás1	CCGTPT	0,3300	0,1980	2989,85	4	2	4,80%	57,50	total	168	1	52
7	Turbo Gás2	CCGTPT	0,3300	0,1980	2989,85	4	2	4,80%	57,50			1	52
8	Turbo Gás3	CCGTPT	0,3300	0,1980	2989,85	4	2	4,80%	57,50			1	52
9	Pego1	Carv. Imp. PT	0,2920	0,0980	3243,11	3	2	3,40%	62,37			1	52
10	Pego2	Carv. Imp. PT	0,2920	0,0980	3243,11	3	2	3,40%	62,37			1	52
11	Pego3	Carv. Imp. PT	0,2920	0,0980	3243,11	3	2	3,40%	62,37			1	52
12	Pego4	Carv. Imp. PT	0,2920	0,0980	3243,11	3	2	3,40%	62,37			1	52
13	Sines1	Carv. Imp. PT	0,2980	0,1090	3345,46	3	3	8,70%	64,34			1	52
14	Sines2	Carv. Imp. PT	0,2980	0,1090	3345,46	3	3	8,70%	64,34			1	52
15	Sines3	Carv. Imp. PT	0,2980	0,1090	3345,46	3	3	8,70%	64,34			1	52
16	Sines4	Carv. Imp. PT	0,2980	0,1090	3345,46	3	3	8,70%	64,34			1	52
17	Setúbal1	Fuelóleo	0,2366	0,1420	5568,83	6	2	8,50%	107,09			1	52
18	Setúbal2	Fuelóleo	0,2366	0,1420	5568,83	6	2	8,50%	107,09			1	52
19	Setúbal3	Fuelóleo	0,2366	0,1420	5568,83	6	2	8,50%	107,09			1	52
20	Setúbal4	Fuelóleo	0,2366	0,1420	5568,83	6	2	8,50%	107,09			1	52
21	Carregado 56 1	Fuelóleo	0,1187	0,0712	5845,42	5	1	13,70%	112,41			1	52
22	Carregado 56 2	Fuelóleo	0,1187	0,0712	5845,42	5	1	13,70%	112,41			1	52
23	Carregado 12 1	Fuelóleo	0,1185	0,0711	5845,42	5	1	13,70%	112,41			1	52
24	Carregado 12 2	Fuelóleo	0,1185	0,0711	5845,42	5	1	13,70%	112,41			1	52
25	Carregado 34 1	Fuelóleo	0,1185	0,0711	6202,98	5	1	13,70%	119,29			1	52
26	Carregado 34 2	Fuelóleo	0,1185	0,0711	6202,98	5	1	13,70%	119,29			1	52
27	Barreiro	Fuelóleo	0,0560	0,0336	6414,07	5	1	11,50%	123,35			1	52
28	Tunes 34 1	Gasóleo	0,0825	0,0495	14852,90	2	1	4,30%	285,63			1	52
29	Tunes 34 2	Gasóleo	0,0825	0,0495	14852,90	2	1	4,30%	285,63			1	52
30	ENSRP		0,80		#####				#####			1	52

Tabela A2 - Características dos grupos considerados no 1º período horário.

1PH									
nºgrupo	Id. Central	Tecnologia	Pot. Máxima (GWh)	Pot. Mínima (GWh)	Enc. Var. €/GWh	Indisp. Fort.	Disponibilidade do grupo neste posto horário	Postos horários	nº de horas semanais
1	LARES1	CCGTPT	3,5280	1,7640	54156,98	1,10%	1	1PH - 5%	8,4
2	LARES2	CCGTPT	3,5280	1,7640	54156,98	1,10%	1	2PH - 30%	50,4
3	CRJ1	CCGTPT	3,2928	1,9757	55166,61	1,10%	1	3PH - 18%	30,24
4	CRJ2	CCGTPT	3,2928	1,9757	55166,61	1,10%	1	4PH - 20%	33,6
5	CRJ3	CCGTPT	3,2928	1,9757	55166,61	1,10%	1	5PH - 27%	45,36
6	Turbo Gás1	CCGTPT	2,7720	1,6632	57497,17	4,80%	1	total	168
7	Turbo Gás2	CCGTPT	2,7720	1,6632	57497,17	4,80%	1		
8	Turbo Gás3	CCGTPT	2,7720	1,6632	57497,17	4,80%	1		
9	Pego1	Carv. Imp. PT	2,4528	0,8232	62367,42	3,40%	1		
10	Pego2	Carv. Imp. PT	2,4528	0,8232	62367,42	3,40%	1		
11	Pego3	Carv. Imp. PT	2,4528	0,8232	62367,42	3,40%	1		
12	Pego4	Carv. Imp. PT	2,4528	0,8232	62367,42	3,40%	1		
13	Sines1	Carv. Imp. PT	2,5032	0,9156	64335,81	8,70%	1		
14	Sines2	Carv. Imp. PT	2,5032	0,9156	64335,81	8,70%	1		
15	Sines3	Carv. Imp. PT	2,5032	0,9156	64335,81	8,70%	1		
16	Sines4	Carv. Imp. PT	2,5032	0,9156	64335,81	8,70%	1		
17	Setúbal1	Fuelóleo	1,9874	1,1925	107092,89	8,50%	1		
18	Setúbal2	Fuelóleo	1,9874	1,1925	107092,89	8,50%	1		
19	Setúbal3	Fuelóleo	1,9874	1,1925	107092,89	8,50%	1		
20	Setúbal4	Fuelóleo	1,9874	1,1925	107092,89	8,50%	1		
21	Carregado 56 1	Fuelóleo	0,9971	0,5982	112411,98	13,70%	1		
22	Carregado 56 2	Fuelóleo	0,9971	0,5982	112411,98	13,70%	1		
23	Carregado 12 1	Fuelóleo	0,9954	0,5972	112411,98	13,70%	1		
24	Carregado 12 2	Fuelóleo	0,9954	0,5972	112411,98	13,70%	1		
25	Carregado 34 1	Fuelóleo	0,9954	0,5972	119288,15	13,70%	1		
26	Carregado 34 2	Fuelóleo	0,9954	0,5972	119288,15	13,70%	1		
27	Barreiro	Fuelóleo	0,4704	0,2822	123347,52	11,50%	1		
28	Tunes 34 1	Gasóleo	0,6930	0,4158	285632,60	4,30%	1		
29	Tunes 34 2	Gasóleo	0,6930	0,4158	285632,60	4,30%	1		
30	ENSRP		6,7200	0,0000	#####	0,00%	1		

Tabela A3 - Características dos grupos considerados no 2º período horário.

2PH									
nºgrupo	Id. Central	Tecnologia	Pot. Máxima (GWh)	Pot. Mínima (GWh)	Enc. Var. €/GWh	Indisp. Fort.	Disponibilidade do grupo neste posto horário	Postos horários	nº de horas semanais
1	LARES1	CCGTPT	21,1680	10,5840	54156,98	1,10%	1	1PH - 5%	8,4
2	LARES2	CCGTPT	21,1680	10,5840	54156,98	1,10%	1	2PH - 30%	50,4
3	CRJ1	CCGTPT	19,7568	11,8541	55166,61	1,10%	1	3PH - 18%	30,24
4	CRJ2	CCGTPT	19,7568	11,8541	55166,61	1,10%	1	4PH - 20%	33,6
5	CRJ3	CCGTPT	19,7568	11,8541	55166,61	1,10%	1	5PH - 27%	45,36
6	Turbo Gás1	CCGTPT	16,6320	9,9792	57497,17	4,80%	1	total	168
7	Turbo Gás2	CCGTPT	16,6320	9,9792	57497,17	4,80%	1		
8	Turbo Gás3	CCGTPT	16,6320	9,9792	57497,17	4,80%	1		
9	Pego1	Carv. Imp. PT	14,7168	4,9392	62367,42	3,40%	1		
10	Pego2	Carv. Imp. PT	14,7168	4,9392	62367,42	3,40%	1		
11	Pego3	Carv. Imp. PT	14,7168	4,9392	62367,42	3,40%	1		
12	Pego4	Carv. Imp. PT	14,7168	4,9392	62367,42	3,40%	1		
13	Sines1	Carv. Imp. PT	15,0192	5,4936	64335,81	8,70%	1		
14	Sines2	Carv. Imp. PT	15,0192	5,4936	64335,81	8,70%	1		
15	Sines3	Carv. Imp. PT	15,0192	5,4936	64335,81	8,70%	1		
16	Sines4	Carv. Imp. PT	15,0192	5,4936	64335,81	8,70%	1		
17	Setúbal1	Fuelóleo	11,9246	7,1548	107092,89	8,50%	1		
18	Setúbal2	Fuelóleo	11,9246	7,1548	107092,89	8,50%	1		
19	Setúbal3	Fuelóleo	11,9246	7,1548	107092,89	8,50%	1		
20	Setúbal4	Fuelóleo	11,9246	7,1548	107092,89	8,50%	1		
21	Carregado 56 1	Fuelóleo	5,9825	3,5895	112411,98	13,70%	1		
22	Carregado 56 2	Fuelóleo	5,9825	3,5895	112411,98	13,70%	1		
23	Carregado 12 1	Fuelóleo	5,9724	3,5834	112411,98	13,70%	1		
24	Carregado 12 2	Fuelóleo	5,9724	3,5834	112411,98	13,70%	1		
25	Carregado 34 1	Fuelóleo	5,9724	3,5834	119288,15	13,70%	1		
26	Carregado 34 2	Fuelóleo	5,9724	3,5834	119288,15	13,70%	1		
27	Barreiro	Fuelóleo	2,8224	1,6934	123347,52	11,50%	1		
28	Tunes 34 1	Gasóleo	4,1580	2,4948	285632,60	4,30%	1		
29	Tunes 34 2	Gasóleo	4,1580	2,4948	285632,60	4,30%	1		
30	ENSRP		40,3200	0,0000	#####	0,00%	1		

Tabela A4 - Características dos grupos considerados no 3º período horário.

3PH

nºgrupo	Id. Central	Tecnologia	Pot. Máxima (GWh)	Pot. Mínima (GWh)	Enc. Var. €/GWh	Indisp. Fort.	Disponibilidade do grupo neste posto horário	Postos horários	nº de horas semanais
1	LARES1	CCGTPT	12,7008	6,3504	54156,98	1,10%	1	1PH - 5%	8,4
2	LARES2	CCGTPT	12,7008	6,3504	54156,98	1,10%	1	2PH - 30%	50,4
3	CRJ1	CCGTPT	11,8541	7,1124	55166,61	1,10%	1	3PH - 18%	30,24
4	CRJ2	CCGTPT	11,8541	7,1124	55166,61	1,10%	1	4PH - 20%	33,6
5	CRJ3	CCGTPT	11,8541	7,1124	55166,61	1,10%	1	5PH - 27%	45,36
6	Turbo Gás1	CCGTPT	9,9792	5,9875	57497,17	4,80%	1	total	168
7	Turbo Gás2	CCGTPT	9,9792	5,9875	57497,17	4,80%	1		
8	Turbo Gás3	CCGTPT	9,9792	5,9875	57497,17	4,80%	1		
9	Pego1	Carv. Imp. PT	8,8301	2,9635	62367,42	3,40%	1		
10	Pego2	Carv. Imp. PT	8,8301	2,9635	62367,42	3,40%	1		
11	Pego3	Carv. Imp. PT	8,8301	2,9635	62367,42	3,40%	1		
12	Pego4	Carv. Imp. PT	8,8301	2,9635	62367,42	3,40%	1		
13	Sines1	Carv. Imp. PT	9,0115	3,2962	64335,81	8,70%	1		
14	Sines2	Carv. Imp. PT	9,0115	3,2962	64335,81	8,70%	1		
15	Sines3	Carv. Imp. PT	9,0115	3,2962	64335,81	8,70%	1		
16	Sines4	Carv. Imp. PT	9,0115	3,2962	64335,81	8,70%	1		
17	Setúbal1	Fuelóleo	7,1548	4,2929	107092,89	8,50%	1		
18	Setúbal2	Fuelóleo	7,1548	4,2929	107092,89	8,50%	1		
19	Setúbal3	Fuelóleo	7,1548	4,2929	107092,89	8,50%	1		
20	Setúbal4	Fuelóleo	7,1548	4,2929	107092,89	8,50%	1		
21	Carregado 56 1	Fuelóleo	3,5895	2,1537	112411,98	13,70%	1		
22	Carregado 56 2	Fuelóleo	3,5895	2,1537	112411,98	13,70%	1		
23	Carregado 12 1	Fuelóleo	3,5834	2,1501	112411,98	13,70%	1		
24	Carregado 12 2	Fuelóleo	3,5834	2,1501	112411,98	13,70%	1		
25	Carregado 34 1	Fuelóleo	3,5834	2,1501	119288,15	13,70%	1		
26	Carregado 34 2	Fuelóleo	3,5834	2,1501	119288,15	13,70%	1		
27	Barreiro	Fuelóleo	1,6934	1,0161	123347,52	11,50%	1		
28	Tunes 34 1	Gasóleo	2,4948	1,4969	285632,60	4,30%	1		
29	Tunes 34 2	Gasóleo	2,4948	1,4969	285632,60	4,30%	1		
30	ENSRP		24,1920	0,0000	#####	0,00%	1		



Tabela A5 - Características dos grupos considerados no 4º período horário.

4PH									
nºgrupo	Id. Central	Tecnologia	Pot. Máxima (GWh)	Pot. Mínima (GWh)	Enc. Var. €/GWh	Indisp. Fort.	Disponibilidade do grupo neste posto horário	Postos horários	nº de horas semanais
1	LARES1	CCGTPT	14,1120	7,0560	54156,98	1,10%	1	1PH - 5%	8,4
2	LARES2	CCGTPT	14,1120	7,0560	54156,98	1,10%	1	2PH - 30%	50,4
3	CRJ1	CCGTPT	13,1712	7,9027	55166,61	1,10%	1	3PH - 18%	30,24
4	CRJ2	CCGTPT	13,1712	7,9027	55166,61	1,10%	1	4PH - 20%	33,6
5	CRJ3	CCGTPT	13,1712	7,9027	55166,61	1,10%	1	5PH - 27%	45,36
6	Turbo Gás1	CCGTPT	11,0880	6,6528	57497,17	4,80%	1	total	168
7	Turbo Gás2	CCGTPT	11,0880	6,6528	57497,17	4,80%	1		
8	Turbo Gás3	CCGTPT	11,0880	6,6528	57497,17	4,80%	1		
9	Pego1	Carv. Imp. PT	9,8112	3,2928	62367,42	3,40%	1		
10	Pego2	Carv. Imp. PT	9,8112	3,2928	62367,42	3,40%	1		
11	Pego3	Carv. Imp. PT	9,8112	3,2928	62367,42	3,40%	1		
12	Pego4	Carv. Imp. PT	9,8112	3,2928	62367,42	3,40%	1		
13	Sines1	Carv. Imp. PT	10,0128	3,6624	64335,81	8,70%	1		
14	Sines2	Carv. Imp. PT	10,0128	3,6624	64335,81	8,70%	1		
15	Sines3	Carv. Imp. PT	10,0128	3,6624	64335,81	8,70%	1		
16	Sines4	Carv. Imp. PT	10,0128	3,6624	64335,81	8,70%	1		
17	Setúbal1	Fuelóleo	7,9498	4,7699	107092,89	8,50%	1		
18	Setúbal2	Fuelóleo	7,9498	4,7699	107092,89	8,50%	1		
19	Setúbal3	Fuelóleo	7,9498	4,7699	107092,89	8,50%	1		
20	Setúbal4	Fuelóleo	7,9498	4,7699	107092,89	8,50%	1		
21	Carregado 56 1	Fuelóleo	3,9883	2,3930	112411,98	13,70%	1		
22	Carregado 56 2	Fuelóleo	3,9883	2,3930	112411,98	13,70%	1		
23	Carregado 12 1	Fuelóleo	3,9816	2,3890	112411,98	13,70%	1		
24	Carregado 12 2	Fuelóleo	3,9816	2,3890	112411,98	13,70%	1		
25	Carregado 34 1	Fuelóleo	3,9816	2,3890	119288,15	13,70%	1		
26	Carregado 34 2	Fuelóleo	3,9816	2,3890	119288,15	13,70%	1		
27	Barreiro	Fuelóleo	1,8816	1,1290	123347,52	11,50%	1		
28	Tunes 34 1	Gasóleo	2,7720	1,6632	285632,60	4,30%	1		
29	Tunes 34 2	Gasóleo	2,7720	1,6632	285632,60	4,30%	1		
30	ENSRP		26,8800	0,0000	#####	0,00%	1		

Tabela A6 - Características dos grupos considerados no 5º período horário.

5PH

nºgrupo	Id. Central	Tecnologia	Pot. Máxima (GWh)	Pot. Mínima (GWh)	Enc. Var. €/GWh	Indisp. Fort.	Disponibilidade do grupo neste posto horário	Postos horários	nº de horas semanais
1	LARES1	CCGTPT	19,0512	9,5256	54156,98	1,10%	1	1PH - 5%	8,4
2	LARES2	CCGTPT	19,0512	9,5256	54156,98	1,10%	1	2PH - 30%	50,4
3	CRJ1	CCGTPT	17,7811	10,6687	55166,61	1,10%	1	3PH - 18%	30,24
4	CRJ2	CCGTPT	17,7811	10,6687	55166,61	1,10%	1	4PH - 20%	33,6
5	CRJ3	CCGTPT	17,7811	10,6687	55166,61	1,10%	1	5PH - 27%	45,36
6	Turbo Gás1	CCGTPT	14,9688	8,9813	57497,17	4,80%	1	total	168
7	Turbo Gás2	CCGTPT	14,9688	8,9813	57497,17	4,80%	1		
8	Turbo Gás3	CCGTPT	14,9688	8,9813	57497,17	4,80%	1		
9	Pego1	Carv. Imp. PT	13,2451	4,4453	62367,42	3,40%	1		
10	Pego2	Carv. Imp. PT	13,2451	4,4453	62367,42	3,40%	1		
11	Pego3	Carv. Imp. PT	13,2451	4,4453	62367,42	3,40%	1		
12	Pego4	Carv. Imp. PT	13,2451	4,4453	62367,42	3,40%	1		
13	Sines1	Carv. Imp. PT	13,5173	4,9442	64335,81	8,70%	1		
14	Sines2	Carv. Imp. PT	13,5173	4,9442	64335,81	8,70%	1		
15	Sines3	Carv. Imp. PT	13,5173	4,9442	64335,81	8,70%	1		
16	Sines4	Carv. Imp. PT	13,5173	4,9442	64335,81	8,70%	1		
17	Setúbal1	Fuelóleo	10,7322	6,4393	107092,89	8,50%	1		
18	Setúbal2	Fuelóleo	10,7322	6,4393	107092,89	8,50%	1		
19	Setúbal3	Fuelóleo	10,7322	6,4393	107092,89	8,50%	1		
20	Setúbal4	Fuelóleo	10,7322	6,4393	107092,89	8,50%	1		
21	Carregado 56 1	Fuelóleo	5,3842	3,2305	112411,98	13,70%	1		
22	Carregado 56 2	Fuelóleo	5,3842	3,2305	112411,98	13,70%	1		
23	Carregado 12 1	Fuelóleo	5,3752	3,2251	112411,98	13,70%	1		
24	Carregado 12 2	Fuelóleo	5,3752	3,2251	112411,98	13,70%	1		
25	Carregado 34 1	Fuelóleo	5,3752	3,2251	119288,15	13,70%	1		
26	Carregado 34 2	Fuelóleo	5,3752	3,2251	119288,15	13,70%	1		
27	Barreiro	Fuelóleo	2,5402	1,5241	123347,52	11,50%	1		
28	Tunes 34 1	Gasóleo	3,7422	2,2453	285632,60	4,30%	1		
29	Tunes 34 2	Gasóleo	3,7422	2,2453	285632,60	4,30%	1		
30	ENSRP		36,2880	0,0000	#####	0,00%	1		

Tabela A7 – Disponibilidade dos grupos, variável  $i_{kt}$ .

## Disponibilidade dos grupos (ikt)

[illegible]

Tabela A8 – Divisão de meses para semanas.

	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN		JUL
Divisão do mês para semanas								
a)						9		11
b)	31	28	31	30	31	30		31
c)	7	7	7	7	3	7	7	7
d)	28	25	26	24	22	19	17	

	AUG	SET	OCT	NOV	DEC
a) 14	17	19	22	24	27
b) 31	30	31	30	31	
c)	14	11	9	6	4

- a) Dias do mês anterior que transitam para próxima semana  
b) Número de dias de cada mês  
c) Dias necessários do mês em questão para preencher a semana  
d) Números de dias gastos do mês em questão ao fim de 4 semanas, restantes dias transitam para as próximas semanas

Tabela A9 – Valores da carga referentes ao ano de 2005.

Carga mensal (GWh)														
	Período	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SET	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2005	1PH	353,618	305,536	324,224	269,335	278,105	283,590	301,996	276,726	277,627	289,055	312,822	347,612	3620,246
	2PH	1791,535	1589,761	1637,33	1444,444	1498,997	1508,885	1596,862	1449,111	1513,128	1554,595	1614,896	1776,867	18976,41
	3PH	942,2648	844,5599	856,754	751,7378	783,9094	783,4913	839,384	766,3868	799,5822	820,9567	852,7488	922,7074	9964,483
	4PH	863,6962	777,8552	798,8894	706,6884	730,768	740,3528	789,5068	741,514	745,7456	766,0399	792,1696	868,3314	9321,557
	5PH	949,0123	875,9571	897,8362	815,8782	847,6147	864,5797	923,1862	862,5723	865,3002	882,641	888,28	981,4564	10654,31

Carga média diária (GWH)													
	Período	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SET	OCT	NOV	DEC
2005	1PH	11,40702	10,91199	10,45885	8,977841	8,971127	9,453002	9,741804	8,926652	9,254248	9,324354	10,42739	11,21328
	2PH	57,79145	56,77719	52,81711	48,14813	48,35475	50,29616	51,51167	46,7455	50,43761	50,14823	53,82988	57,31829
	3PH	30,39564	30,16285	27,63723	25,05793	25,2874	26,11638	27,0769	24,72216	26,65274	26,48247	28,42496	29,76475
	4PH	27,86117	27,78054	25,77062	23,55628	23,57316	24,67843	25,46796	23,91981	24,85819	24,71096	26,40565	28,01069
	5PH	30,6133	31,28418	28,96246	27,19594	27,34241	28,81932	29,7802	27,82491	28,84334	28,47229	29,60933	31,65988

Valores semanais de Carga (GWh)																			
	Período	1 semana	2 semana	3 semana	4 semana	5 semana	6 semana	7 semana	8 semana	9 semana	10 semana	11 semana	12 semana	13 semana	14 semana	15 semana	16 semana	17 semana	18 semana
2005	1PH	79,84913	79,84913	79,84913	79,84913	77,86902	76,38394	76,38394	76,38394	85,03021	73,21194	73,21194	73,21194	79,22776	62,84489	62,84489	62,84489	62,83817	62,79789
	2PH	404,5402	404,5402	404,5402	404,5402	400,4831	397,4403	397,4403	397,4403	434,4171	369,7198	369,7198	369,7198	408,53	337,0369	337,0369	337,0369	337,2436	338,4833
	3PH	212,7695	212,7695	212,7695	212,7695	211,8383	211,14	211,14	211,14	228,6747	193,4606	193,4606	193,4606	213,3599	175,4055	175,4055	175,4055	175,635	177,0118
	4PH	195,0282	195,0282	195,0282	195,0282	194,7057	194,4638	194,4638	194,4638	212,1948	180,3944	180,3944	180,3944	199,522	164,894	164,894	164,894	164,9108	165,0121
	5PH	214,2931	214,2931	214,2931	214,2931	216,9766	218,9893	218,9893	218,9893	238,6648	202,7372	202,7372	202,7372	226,4001	190,3716	190,3716	190,3716	190,518	191,3969

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana
62,79789	62,79789	62,79789	65,20727	66,17102	66,17102	66,17102	67,03742	68,19263	68,19263	68,19263	68,19263	62,48656	62,48656	62,48656	62,48656	63,79695	64,77974	64,77974	64,77974
338,4833	338,4833	338,4833	348,1903	352,0731	352,0731	352,0731	355,7197	360,5817	360,5817	360,5817	360,5817	327,2185	327,2185	327,2185	327,2185	341,987	353,0633	353,0633	353,0633
177,0118	177,0118	177,0118	181,1567	182,8146	182,8146	182,8146	185,6962	189,5383	189,5383	189,5383	189,5383	173,0551	173,0551	173,0551	173,0551	180,7774	186,5692	186,5692	186,5692
165,0121	165,0121	165,0121	170,5385	172,749	172,749	172,749	175,1176	178,2757	178,2757	178,2757	178,2757	167,4386	167,4386	167,4386	167,4386	171,1922	174,0073	174,0073	174,0073
191,3969	191,3969	191,3969	198,7814	201,7353	201,7353	201,7353	204,6179	208,4614	208,4614	208,4614	208,4614	194,7744	194,7744	194,7744	194,7744	198,8481	201,9034	201,9034	201,9034

Tabela A9 – Valores da carga referentes ao ano de 2005. (Continuação)

	Valores semanais de Carga (GWh)														
	Período	39 semana	40 semana	41 semana	42 semana	43 semana	44 semana	45 semana	46 semana	47 semana	48 semana	49 semana	50 semana	51 semana	52 semana
2005	1PH	64,91995	65,27048	65,27048	65,27048	65,27048	71,88871	72,99175	72,99175	72,99175	76,1353	78,49296	78,49296	78,49296	67,27968
	2PH	352,4845	351,0376	351,0376	351,0376	351,0376	373,1275	376,8092	376,8092	376,8092	390,7628	401,228	401,228	401,228	343,9097
	3PH	186,2286	185,3773	185,3773	185,3773	185,3773	197,0322	198,9747	198,9747	198,9747	204,3339	208,3533	208,3533	208,3533	178,5885
	4PH	173,7129	172,9768	172,9768	172,9768	172,9768	183,1449	184,8396	184,8396	184,8396	191,2597	196,0748	196,0748	196,0748	168,0641
	5PH	201,1613	199,306	199,306	199,306	199,306	206,1283	207,2653	207,2653	207,2653	215,4675	221,6192	221,6192	221,6192	189,9593

Tabela A10 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Hídrica.

Produção Hídrica mensal (GWh)														
	Período	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SET	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2005	1PH	93,469	84,897	108,330	82,728	66,469	65,642	46,098	26,222	32,404	47,672	77,598	104,156	835,686
	2PH	250,542	305,807	336,8758	355,4496	270,697	176,9688	108,4752	45,62208	92,88	142,223	287,3016	455,819	2828,661
	3PH	32,87736	105,6707	41,75626	121,0464	68,36616	17,83296	0,749952	0,73656	1,06272	41,79643	114,4498	182,0375	728,3827
	4PH	22,27536	19,0848	28,15296	58,3056	17,51376	4,0032	0,78864	0,78864	0,4896	20,17728	46,4112	86,54208	304,5331
	5PH	24,38683	-105,181	25,21044	35,34192	17,53682	0,89424	-4,78094	-9,28066	-2,09952	15,28697	27,81864	60,12338	85,25736

Produção Hídrica Média diária (GWH)														
	Período	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SET	OCT	NOV	DEC	
2005	1PH	3,01512	3,03204	3,49452	2,7576	2,14416	2,18808	1,48704	0,84588	1,08012	1,5378	2,5866	3,35988	
	2PH	8,082	10,92168	10,86696	11,84832	8,73216	5,89896	3,4992	1,47168	3,096	4,58784	9,57672	14,70384	
	3PH	1,06056	3,773952	1,346976	4,03488	2,20536	0,594432	0,024192	0,02376	0,035424	1,348272	3,814992	5,872176	
	4PH	0,71856	0,6816	0,90816	1,94352	0,56496	0,13344	0,02544	0,02544	0,01632	0,65088	1,54704	2,79168	
	5PH	0,786672	-3,75646	0,81324	1,178064	0,565704	0,029808	-0,15422	-0,29938	-0,06998	0,493128	0,927288	1,939464	

Valores semanais de Produção Hídrica (GWh)																			
	Período	1 semana	2 semana	3 semana	4 semana	5 semana	6 semana	7 semana	8 semana	9 semana	10 semana	11 semana	12 semana	13 semana	14 semana	15 semana	16 semana	17 semana	18 semana
2005	1PH	21,10584	21,10584	21,10584	21,10584	21,17352	21,22428	21,22428	21,22428	26,56872	24,46164	24,46164	24,46164	25,7454	19,3032	19,3032	19,3032	18,68976	15,00912
	2PH	56,574	56,574	56,574	56,574	67,93272	76,45176	76,45176	76,45176	87,09984	76,06872	76,06872	76,06872	89,87976	82,93824	82,93824	82,93824	79,82208	61,12512
	3PH	7,42392	7,42392	7,42392	7,42392	18,27749	26,41766	26,41766	26,41766	18,05674	9,428832	9,428832	9,428832	18,83952	28,24416	28,24416	28,24416	26,41464	15,43752
	4PH	5,02992	5,02992	5,02992	5,02992	4,88208	4,7712	4,7712	4,7712	6,5856	6,35712	6,35712	6,35712	10,37136	13,60464	13,60464	13,60464	12,22608	3,95472
	5PH	5,506704	5,506704	5,506704	5,506704	-12,6658	-26,2952	-26,2952	-26,2952	-7,20317	5,69268	5,69268	5,69268	7,600392	8,246448	8,246448	8,246448	7,634088	3,959928

19 semana	20 semana	21 semana	22 semana	23 semana	24 semana	25 semana	26 semana	27 semana	28 semana	29 semana	30 semana	31 semana	32 semana	33 semana	34 semana	35 semana	36 semana	37 semana	38 semana
15,00912	15,00912	15,00912	15,22872	15,31656	15,31656	15,31656	13,21344	10,40928	10,40928	10,40928	10,40928	5,92116	5,92116	5,92116	5,92116	6,85812	7,56084	7,56084	7,56084
61,12512	61,12512	61,12512	46,95912	41,29272	41,29272	41,29272	34,09344	24,4944	24,4944	24,4944	24,4944	10,30176	10,30176	10,30176	10,30176	16,79904	21,672	21,672	21,672
15,43752	15,43752	15,43752	7,38288	4,161024	4,161024	4,161024	2,450304	0,169344	0,169344	0,169344	0,169344	0,16632	0,16632	0,16632	0,16632	0,212976	0,247968	0,247968	0,247968
3,95472	3,95472	3,95472	1,79712	0,93408	0,93408	0,93408	0,61008	0,17808	0,17808	0,17808	0,17808	0,17808	0,17808	0,17808	0,17808	0,1416	0,11424	0,11424	0,11424
3,959928	3,959928	3,959928	1,280448	0,208656	0,208656	0,208656	-0,34344	-1,07957	-1,07957	-1,07957	-1,07957	-1,07957	-2,09563	-2,09563	-2,09563	-2,09563	-1,17806	-0,48989	-0,48989

Tabela A10 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Hídrica. (continuação)

	Valores semanais de Carga (GWh)														
	Período	39 semana	40 semana	41 semana	42 semana	43 semana	44 semana	45 semana	46 semana	47 semana	48 semana	49 semana	50 semana	51 semana	52 semana
2005	1PH	8,4762	10,7646	10,7646	10,7646	10,7646	17,0574	18,1062	18,1062	18,1062	21,19932	23,51916	23,51916	23,51916	20,15928
	2PH	24,65568	32,11488	32,11488	32,11488	32,11488	62,04816	67,03704	67,03704	67,03704	87,54552	102,9269	102,9269	102,9269	88,22304
	3PH	2,873664	9,437904	9,437904	9,437904	9,437904	24,23822	26,70494	26,70494	26,70494	34,93368	41,10523	41,10523	41,10523	35,23306
	4PH	1,38336	4,55616	4,55616	4,55616	4,55616	9,93312	10,82928	10,82928	10,82928	15,80784	19,54176	19,54176	19,54176	16,75008
	5PH	0,636336	3,451896	3,451896	3,451896	3,451896	6,056856	6,491016	6,491016	6,491016	10,53972	13,57625	13,57625	13,57625	11,63678



Tabela A11 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Eólica.

Eólica mensal (GWh)														
	Período	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SET	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2005	1PH	26,455	21,277	19,019	32,352	18,208	15,993	15,469	18,721	19,214	25,450	36,348	47,710	296,217
	2PH	157,1185	118,5471	132,8422	237,1896	100,0484	120,1015	116,601	125,0879	99,62765	144,0889	212,5618	276,1007	1839,915
	3PH	87,30327	60,63903	84,46778	146,1533	53,67296	78,19421	70,24266	75,1883	65,18665	88,23745	126,9167	143,8923	1080,095
	4PH	87,69038	69,71868	97,65898	140,9319	66,05577	91,53856	77,36356	84,03915	70,97212	92,94537	140,3449	162,3634	1181,623
	5PH	126,0422	95,12281	131,7352	200,1014	85,54299	129,4374	115,53	118,1512	89,07992	134,263	199,1495	236,0881	1660,244

Eólica Média diária (GWh)													
	Período	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SET	OCT	NOV	DEC
2005	1PH	0,85339	0,7599	0,613527	1,078415	0,587364	0,533102	0,498995	0,603908	0,640477	0,820957	1,211592	1,539036
	2PH	5,06834	4,233826	4,285232	7,906319	3,227366	4,003384	3,761322	4,035094	3,320922	4,64803	7,085395	8,906475
	3PH	2,816235	2,16568	2,724767	4,871775	1,731386	2,606474	2,265892	2,425429	2,172888	2,846369	4,230556	4,641688
	4PH	2,828722	2,489953	3,15029	4,697729	2,130831	3,051285	2,495599	2,71094	2,365737	2,998238	4,678165	5,237527
	5PH	4,065879	3,397243	4,249523	6,670048	2,759451	4,314579	3,726775	3,811329	2,969331	4,331064	6,638318	7,615745

Valores semanais de Eolica (GWh)																			
	Período	1 semana	2 semana	3 semana	4 semana	5 semana	6 semana	7 semana	8 semana	9 semana	10 semana	11 semana	12 semana	13 semana	14 semana	15 semana	16 semana	17 semana	18 semana
2005	1PH	5,973727	5,973727	5,973727	5,973727	5,599767	5,319298	5,319298	5,319298	5,347332	4,294686	4,294686	4,294686	6,302877	7,548904	7,548904	7,548904	7,057853	4,111547
	2PH	35,47838	35,47838	35,47838	35,47838	32,14032	29,63678	29,63678	29,63678	34,12764	29,99662	29,99662	29,99662	45,14512	55,34423	55,34423	55,34423	50,66528	22,59156
	3PH	19,71364	19,71364	19,71364	19,71364	17,11142	15,15976	15,15976	15,15976	20,12087	19,07337	19,07337	19,07337	28,23916	34,10243	34,10243	34,10243	30,96204	12,1197
	4PH	19,80105	19,80105	19,80105	19,80105	18,44598	17,42967	17,42967	17,42967	23,22131	22,05203	22,05203	22,05203	29,84464	32,8841	32,8841	32,8841	30,31721	14,91582
	5PH	28,46115	28,46115	28,46115	28,46115	25,78661	23,7807	23,7807	23,7807	31,43935	29,74666	29,74666	29,74666	41,25776	46,69034	46,69034	46,69034	42,77974	19,31616

19 semana	20 semana	21 semana	22 semana	23 semana	24 semana	25 semana	26 semana	27 semana	28 semana	29 semana	30 semana	31 semana	32 semana	33 semana	34 semana	35 semana	36 semana	37 semana	38 semana
4,111547	4,111547	4,111547	3,840236	3,731712	3,731712	3,731712	3,629392	3,492965	3,492965	3,492965	3,492965	4,227359	4,227359	4,227359	4,227359	4,373634	4,48334	4,48334	4,48334
22,59156	22,59156	22,59156	26,47165	28,02369	28,02369	28,02369	27,2975	26,32925	26,32925	26,32925	26,32925	28,24566	28,24566	28,24566	28,24566	25,38897	23,24645	23,24645	23,24645
12,1197	12,1197	12,1197	16,49514	18,24531	18,24531	18,24531	17,22357	15,86125	15,86125	15,86125	15,86125	16,978	16,978	16,978	16,978	15,96784	15,21022	15,21022	15,21022
14,91582	14,91582	14,91582	19,51809	21,359	21,359	21,359	19,69194	17,46919	17,46919	17,46919	17,46919	18,97658	18,97658	18,97658	18,97658	17,59577	16,56016	16,56016	16,56016
19,31616	19,31616	19,31616	27,0918	30,20205	30,20205	30,20205	28,43864	26,08742	26,08742	26,08742	26,08742	26,67931	26,67931	26,67931	26,67931	23,31131	20,78531	20,78531	20,78531

Tabela A11 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Eólica. (Continuação)

	Valores semanais de Carga (GWh)														
	Período	39 semana	40 semana	41 semana	42 semana	43 semana	44 semana	45 semana	46 semana	47 semana	48 semana	49 semana	50 semana	51 semana	52 semana
2005	1PH	4,844299	5,746699	5,746699	5,746699	5,746699	8,090508	8,481143	8,481143	8,481143	9,790919	10,77325	10,77325	10,77325	9,234215
	2PH	25,90067	32,53621	32,53621	32,53621	32,53621	47,1604	49,59776	49,59776	49,59776	56,88209	62,34533	62,34533	62,34533	53,43885
	3PH	16,55718	19,92458	19,92458	19,92458	19,92458	28,22971	29,61389	29,61389	29,61389	31,25842	32,49181	32,49181	32,49181	27,85013
	4PH	17,82516	20,98766	20,98766	20,98766	20,98766	31,06723	32,74715	32,74715	32,74715	34,9846	36,66269	36,66269	36,66269	31,42516
	5PH	23,50878	30,31745	30,31745	30,31745	30,31745	44,16097	46,46823	46,46823	46,46823	50,37794	53,31022	53,31022	53,31022	45,69447

Tabela A12 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Outras PRE.

Outras PRE mensal (GWh)														
	Período	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SET	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2005	1PH	27,200	24,500	27,200	26,300	27,200	26,300	27,200	27,200	26,300	27,200	26,300	27,200	320,100
	2PH	163	147,2	163	157,7	163	157,7	163	163	157,7	163	157,7	163	1919
	3PH	97,8	88,3	97,8	94,6	97,8	94,6	97,8	97,8	94,6	97,8	94,6	97,8	1151,3
	4PH	108,6	98,1	108,6	105,1	108,6	105,1	108,6	108,6	105,1	108,6	105,1	108,6	1278,7
	5PH	146,7	132,5	146,7	141,9	146,7	141,9	146,7	146,7	141,9	146,7	141,9	146,7	1727

Outras PRE Média diária (GWh)													
	Período	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SET	OCT	NOV	DEC
2005	1PH	0,877419	0,875	0,877419	0,876667	0,877419	0,876667	0,877419	0,877419	0,876667	0,877419	0,876667	0,877419
	2PH	5,258065	5,257143	5,258065	5,256667	5,258065	5,256667	5,258065	5,258065	5,256667	5,258065	5,256667	5,258065
	3PH	3,154839	3,153571	3,154839	3,153333	3,154839	3,153333	3,154839	3,154839	3,153333	3,154839	3,153333	3,154839
	4PH	3,503226	3,503571	3,503226	3,503333	3,503226	3,503333	3,503226	3,503226	3,503333	3,503226	3,503333	3,503226
	5PH	4,732258	4,732143	4,732258	4,73	4,732258	4,73	4,732258	4,732258	4,73	4,732258	4,73	4,732258

Valores semanais de outras PRE (GWh)																			
	Período	1 semana	2 semana	3 semana	4 semana	5 semana	6 semana	7 semana	8 semana	9 semana	10 semana	11 semana	12 semana	13 semana	14 semana	15 semana	16 semana	17 semana	18 semana
2005	1PH	6,141935	6,141935	6,141935	6,141935	6,132258	6,125	6,125	6,125	7,012097	6,141935	6,141935	6,141935	7,017097	6,136667	6,136667	6,136667	6,137419	6,141935
	2PH	36,80645	36,80645	36,80645	36,80645	36,80276	36,8	36,8	36,8	42,06175	36,80645	36,80645	36,80645	42,06032	36,79667	36,79667	36,79667	36,79806	36,80645
	3PH	22,08387	22,08387	22,08387	22,08387	22,0788	22,075	22,075	22,075	25,23491	22,08387	22,08387	22,08387	25,23419	22,07333	22,07333	22,07333	22,07484	22,08387
	4PH	24,52258	24,52258	24,52258	24,52258	24,52396	24,525	24,525	24,525	28,02684	24,52258	24,52258	24,52258	28,02613	24,52333	24,52333	24,52333	24,52323	24,52258
	5PH	33,12581	33,12581	33,12581	33,12581	33,12535	33,125	33,125	33,125	37,85772	33,12581	33,12581	33,12581	37,85129	33,11	33,11	33,11	33,11226	33,12581

19 semana	20 semana	21 semana	22 semana	23 semana	24 semana	25 semana	26 semana	27 semana	28 semana	29 semana	30 semana	31 semana	32 semana	33 semana	34 semana	35 semana	36 semana	37 semana	38 semana
6,141935	6,141935	6,141935	6,138172	6,136667	6,136667	6,136667	6,138925	6,141935	6,141935	6,141935	6,141935	6,141935	6,141935	6,141935	6,141935	6,138925	6,136667	6,136667	6,136667
36,80645	36,80645	36,80645	36,79946	36,79667	36,79667	36,79667	36,80086	36,80645	36,80645	36,80645	36,80645	36,80645	36,80645	36,80645	36,80645	36,80086	36,79667	36,79667	36,79667
22,08387	22,08387	22,08387	22,07634	22,07333	22,07333	22,07333	22,07785	22,08387	22,08387	22,08387	22,08387	22,08387	22,08387	22,08387	22,08387	22,07785	22,07333	22,07333	22,07333
24,52258	24,52258	24,52258	24,52312	24,52333	24,52333	24,52333	24,52301	24,52258	24,52258	24,52258	24,52258	24,52258	24,52258	24,52258	24,52258	24,52301	24,52333	24,52333	24,52333
33,12581	33,12581	33,12581	33,11452	33,11	33,11	33,11	33,11677	33,12581	33,12581	33,12581	33,12581	33,12581	33,12581	33,12581	33,12581	33,11677	33,11	33,11	33,11

Tabela A12 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Outras PRE. (continuação)

	Valores semanais de Carga (GWh)														
	Período	39 semana	40 semana	41 semana	42 semana	43 semana	44 semana	45 semana	46 semana	47 semana	48 semana	49 semana	50 semana	51 semana	52 semana
2005	1PH	6,138172	6,141935	6,141935	6,141935	6,141935	6,137419	6,136667	6,136667	6,136667	6,139677	6,141935	6,141935	6,141935	5,264516
	2PH	36,79946	36,80645	36,80645	36,80645	36,80645	36,79806	36,79667	36,79667	36,79667	36,80226	36,80645	36,80645	36,80645	31,54839
	3PH	22,07634	22,08387	22,08387	22,08387	22,08387	22,07484	22,07333	22,07333	22,07333	22,07935	22,08387	22,08387	22,08387	18,92903
	4PH	24,52312	24,52258	24,52258	24,52258	24,52258	24,52323	24,52333	24,52333	24,52333	24,5229	24,52258	24,52258	24,52258	21,01935
	5PH	33,11452	33,12581	33,12581	33,12581	33,12581	33,11226	33,11	33,11	33,11	33,11903	33,12581	33,12581	33,12581	28,39355

Tabela A13 – Valores referentes ao ano 2005 de energia eléctrica relativa às Interligações.

Interligações mensal (GWh)														
	Período	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SET	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2005	1PH	55,000	37,500	52,500	50,800	52,500	50,800	52,500	52,500	50,800	64,000	62,600	51,600	633,100
	2PH	311,7	193,9	344,9	285,1	315	304,9	315	315	304,9	356,3	325,2	260,9	3632,8
	3PH	178,9	95,1	237,8	144,1	189	182,9	189	189	182,9	197,6	181,9	126,1	2094,3
	4PH	204,9	41	215,2	128,7	210	203,2	210	192,7	168,6	149,6	151	95,9	1970,8
	5PH	250,5	168,1	192,1	103,3	227,6	274,4	195,4	125,6	94,1	57,2	46,4	49,8	1784,5

Interligações Média diária (GWH)													
	Período	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SET	OCT	NOV	DEC
2005	1PH	1,774194	1,339286	1,693548	1,693333	1,693548	1,693333	1,693548	1,693548	1,693333	2,064516	2,086667	1,664516
	2PH	10,05484	6,925	11,12581	9,503333	10,16129	10,16333	10,16129	10,16129	10,16333	11,49355	10,84	8,416129
	3PH	5,770968	3,396429	7,670968	4,803333	6,096774	6,096667	6,096774	6,096774	6,096667	6,374194	6,063333	4,067742
	4PH	6,609677	1,464286	6,941935	4,29	6,774194	6,773333	6,774194	6,216129	5,62	4,825806	5,033333	3,093548
	5PH	8,080645	6,003571	6,196774	3,443333	7,341935	9,146667	6,303226	4,051613	3,136667	1,845161	1,546667	1,606452

Valores semanais de Interligações (GWh)																			
	Período	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
		1 semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana
2005	1PH	12,41935	12,41935	12,41935	12,41935	10,67972	9,375	9,375	9,375	12,4856	11,85484	11,85484	11,85484	13,54774	11,85333	11,85333	11,85333	11,85355	11,85484
	2PH	70,38387	70,38387	70,38387	70,38387	57,86452	48,475	48,475	48,475	76,40403	77,88065	77,88065	77,88065	84,13903	66,52333	66,52333	66,52333	67,18129	71,12903
	3PH	40,39677	40,39677	40,39677	40,39677	30,89862	23,775	23,775	23,775	48,54412	53,69677	53,69677	53,69677	52,76484	33,62333	33,62333	33,62333	34,91677	42,67742
	4PH	46,26774	46,26774	46,26774	46,26774	25,68618	10,25	10,25	10,25	39,10253	48,59355	48,59355	48,59355	47,57968	30,03	30,03	30,03	32,51419	47,41935
	5PH	56,56452	56,56452	56,56452	56,56452	48,25622	42,025	42,025	42,025	48,99459	43,37742	43,37742	43,37742	41,31387	24,10333	24,10333	24,10333	28,00194	51,39355

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana
11,85484	11,85484	11,85484	11,85376	11,85333	11,85333	11,85333	11,85398	11,85484	11,85484	11,85484	11,85484	11,85484	11,85484	11,85484	11,85484	11,85398	11,85333	11,85333	11,85333
71,12903	71,12903	71,12903	71,13925	71,14333	71,14333	71,14333	71,1372	71,12903	71,12903	71,12903	71,12903	71,12903	71,12903	71,12903	71,12903	71,1372	71,14333	71,14333	71,14333
42,67742	42,67742	42,67742	42,67688	42,67667	42,67667	42,67667	42,67699	42,67742	42,67742	42,67742	42,67742	42,67742	42,67742	42,67742	42,67742	42,67699	42,67667	42,67667	42,67667
47,41935	47,41935	47,41935	47,41505	47,41333	47,41333	47,41333	47,41591	47,41935	47,41935	47,41935	47,41935	47,41935	43,5129	43,5129	43,5129	43,5129	41,12839	39,34	39,34
51,39355	51,39355	51,39355	60,4172	64,02667	64,02667	64,02667	55,49634	44,12258	44,12258	44,12258	44,12258	28,36129	28,36129	28,36129	28,36129	24,70151	21,95667	21,95667	21,95667

Tabela A13 – Valores referentes ao ano 2005 de energia eléctrica relativa às Interligações. (continuação)

	Valores semanais de Carga (GWh)														
	Período	39 semana	40 semana	41 semana	42 semana	43 semana	44 semana	45 semana	46 semana	47 semana	48 semana	49 semana	50 semana	51 semana	52 semana
2005	1PH	12,5957	14,45161	14,45161	14,45161	14,45161	14,58452	14,60667	14,60667	14,60667	12,91806	11,65161	11,65161	11,65161	9,987097
	2PH	73,80376	80,45484	80,45484	80,45484	80,45484	76,53355	75,88	75,88	75,88	66,18452	58,9129	58,9129	58,9129	50,49677
	3PH	43,23172	44,61935	44,61935	44,61935	44,61935	42,75419	42,44333	42,44333	42,44333	34,46097	28,47419	28,47419	28,47419	24,40645
	4PH	37,75161	33,78065	33,78065	33,78065	33,78065	35,02581	35,23333	35,23333	35,23333	27,47419	21,65484	21,65484	21,65484	18,56129
	5PH	19,37366	12,91613	12,91613	12,91613	12,91613	11,12516	10,82667	10,82667	10,82667	11,06581	11,24516	11,24516	11,24516	9,63871

Tabela A14 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Térmica.

Térmica mensal (GWh)														
	Período	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SET	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2005	1PH	151,494	137,361	117,175	77,155	113,728	124,855	160,729	152,083	148,910	124,734	109,976	116,945	1535,143
	2PH	909,1745	824,3072	659,7125	409,0049	650,2521	749,2145	893,7857	800,4006	858,0208	748,9832	632,133	621,0472	8756,036
	3PH	545,3842	494,8502	394,93	245,8382	375,0703	409,9641	481,5913	403,662	455,8328	395,5228	334,8824	372,8776	4910,406
	4PH	440,2305	549,9517	349,2774	273,651	328,5984	336,511	392,7546	355,3862	400,5839	394,7172	349,3134	414,926	4585,901
	5PH	401,3832	585,415	402,0906	335,2348	370,2348	317,9481	470,3371	481,4017	542,3198	529,191	473,0119	488,7449	5397,313

Térmica Média diária (GWh)													
	Período	JAN	FEV	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SET	OCT	NOV	DEC
2005	1PH	4,886897	4,905766	3,779834	2,571826	3,668635	4,161821	5,184801	4,905896	4,963651	4,023662	3,665868	3,772429
	2PH	29,32821	29,43954	21,28105	13,6335	20,97587	24,97382	28,8318	25,81937	28,60069	24,16075	21,0711	20,03378
	3PH	17,59304	17,67322	12,73968	8,194606	12,09904	13,66547	15,5352	13,02135	15,19443	12,7588	11,16275	12,02831
	4PH	14,20098	19,64113	11,26701	9,121698	10,59995	11,21703	12,6695	11,46407	13,3528	12,73281	11,64378	13,38471
	5PH	12,94785	20,90768	12,97066	11,17449	11,94306	10,59827	15,17216	15,52909	18,07733	17,07068	15,76706	15,76596

	Valores semanais de Térmica (GWh)																			
	Período	1 semana	2 semana	3 semana	4 semana	5 semana	6 semana	7 semana	8 semana	9 semana	10 semana	11 semana	12 semana	13 semana	14 semana	15 semana	16 semana	17 semana	18 semana	
2005	1PH	34,20828	34,20828	34,20828	34,20828	34,28375	34,34036	34,34036	34,34036	33,61647	26,45884	26,45884	26,45884	26,61465	18,00278	18,00278	18,00278	19,09959	25,68045	
	2PH	205,2975	205,2975	205,2975	205,2975	205,7428	206,0768	206,0768	206,0768	194,7239	148,9673	148,9673	148,9673	147,3057	95,43447	95,43447	95,43447	102,7768	146,8311	
	3PH	123,1513	123,1513	123,1513	123,1513	123,472	123,7126	123,7126	123,7126	116,718	89,17773	89,17773	89,17773	88,2822	57,36224	57,36224	57,36224	61,26668	84,6933	
	4PH	99,40688	99,40688	99,40688	99,40688	121,1675	137,4879	137,4879	137,4879	115,2585	78,8691	78,8691	78,8691	83,70016	63,85189	63,85189	63,85189	65,33014	74,19964	
	5PH	90,63492	90,63492	90,63492	90,63492	122,4743	146,3538	146,3538	146,3538	127,5764	90,79465	90,79465	90,79465	98,3768	78,22146	78,22146	78,22146	78,99002	83,60142	

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana	semana
25,68045	25,68045	25,68045	28,14637	29,13274	29,13274	29,13274	32,20169	36,29361	36,29361	36,29361	36,29361	34,34127	34,34127	34,34127	34,34127	34,57229	34,74556	34,74556	34,74556
146,8311	146,8311	146,8311	166,8208	174,8167	174,8167	174,8167	186,3907	201,8226	201,8226	201,8226	201,8226	180,7356	180,7356	180,7356	180,7356	191,8609	200,2048	200,2048	200,2048
84,6933	84,6933	84,6933	92,52543	95,65829	95,65829	95,65829	101,2675	108,7464	108,7464	108,7464	108,7464	91,14947	91,14947	91,14947	91,14947	99,84177	106,361	106,361	106,361
74,19964	74,19964	74,19964	77,28507	78,51924	78,51924	78,51924	82,87665	88,68652	88,68652	88,68652	88,68652	80,2485	80,2485	80,2485	80,2485	87,8034	93,46958	93,46958	93,46958
83,60142	83,60142	83,60142	76,87747	74,18789	74,18789	74,18789	87,90957	106,2051	106,2051	106,2051	106,2051	108,7036	108,7036	108,7036	108,7036	118,8966	126,5413	126,5413	126,5413

Tabela A14 – Valores referentes ao ano 2005 de produção de energia eléctrica por via Térmica. (continuação)

	Valores semanais de Carga (GWh)														
	Período	39 semana	40 semana	41 semana	42 semana	43 semana	44 semana	45 semana	46 semana	47 semana	48 semana	49 semana	50 semana	51 semana	52 semana
2005	1PH	32,86558	28,16563	28,16563	28,16563	28,16563	26,01887	25,66107	25,66107	25,66107	26,08732	26,407	26,407	26,407	22,63457
	2PH	191,325	169,1252	169,1252	169,1252	169,1252	150,5873	147,4977	147,4977	147,4977	143,3484	140,2365	140,2365	140,2365	120,2027
	3PH	101,4897	89,3116	89,3116	89,3116	89,3116	79,73528	78,13922	78,13922	78,13922	81,60148	84,19817	84,19817	84,19817	72,16986
	4PH	92,22962	89,1297	89,1297	89,1297	89,1297	82,5955	81,50647	81,50647	81,50647	88,47018	93,69296	93,69296	93,69296	80,30825
	5PH	124,528	119,4948	119,4948	119,4948	119,4948	111,673	110,3694	110,3694	110,3694	110,365	110,3617	110,3617	110,3617	94,59578



Tabela A15 – Despacho relativo ao 1º exemplo para o 1º período.

[illegible]

Tabela A16 – Despacho relativo ao 1º exemplo para o 2º período.

[illegible]

Tabela A17 – Despacho relativo ao 1º exemplo para o 3º período.

[illegible]

Tabela A18 – Despacho relativo ao 1º exemplo para o 4º período.

[illegible]

Tabela A19 – Despacho relativo ao 1º exemplo para o 5º período.

[illegible]

Tabela A20 – Despacho relativo ao 2º exemplo para o 1º período.

[illegible]

Tabela A21 – Despacho relativo ao 2º exemplo para o 2º período.

[illegible]

Tabela A22 – Despacho relativo ao 2º exemplo para o 3º período.

[illegible]

Tabela A23 – Despacho relativo ao 2º exemplo para o 4º período.

[illegible]

Tabela A24 – Despacho relativo ao 2º exemplo para o 5º período.

[illegible]